



Universitat de Lleida

# TREBALL FINAL DE GRAU



ESCOLA  
POLITÈCNICA SUPERIOR  
UNIVERSITAT DE LLEIDA  
INSPIRING THE FUTURE

**Estudiant:** Bernat Marrero Farré

**Titulació:** Grau en Enginyeria Mecànica

**Títol de Treball Final de Grau:** Metodologia per a la caracterització tridimensional de sistemes verticals de vegetació en edificis mitjançant l'ús del sensor RGB-D Microsoft Kinect

**Director:** Gabriel Pérez i Luque

**Codirector:** Eduard Gregorio López

Presentació

Mes: Juliol

Any: 2018

## Agraïments

Agrair al director del treball, el Dr. Gabriel Pérez i Luque, al codirector, Eduard Gregorio López i a l'Alexandre Escolà Agustí, col·laborador extern, l'oportunitat de col·laborar en aquest projecte, la motivació contínua, els consells rebuts i el valuós suport sense el qual aquest treball no hauria estat possible.

Agrair a l'alumne del Grau d'Enginyeria Mecànica, Roger Arasanz Riba, l'estreta col·laboració i recolzament en la realització d'aquest treball conjunt.

També expressa el meu agraïment al grup d'investigació en ArgòTICa i Agricultura de Precisió per la col·laboració amb l'adquisició de les dades.

Per últim, agrair als meus pares, germà i sobretot a la meva parella el suport donat i les forces per tirar endavant el treball presentat aquí.

## Índex

1	INTRODUCCIÓ.....	7
1.1	Arquitectura vegetada en façanes .....	7
1.1.1	Beneficis de la vegetació present en façanes .....	8
1.2	Contribució de l'agricultura de precisió en la caracterització del fullatge.....	9
1.3	Antecedents de recerca .....	10
1.3.1	Importància del LAI .....	10
1.3.2	Descripció de les mesures del LAI .....	13
1.3.3	Comparativa entre sensors .....	16
1.4	Objectiu .....	18
1.4.1	Objectiu general .....	18
1.4.2	Objectius parcials .....	18
2	MATERIALS I MÈTODES .....	19
2.1	Hardware.....	19
2.1.1	Descripció del sensor Kinect v2.....	19
2.2	Programari.....	20
2.2.1	Visualització i edició dels núvols de punts .....	20
2.2.2	Càlculs generals.....	21
2.2.3	Tractament estadístic.....	21
2.3	Escaneig experimental de les façanes.....	22
2.4	Tractament de dades .....	24
2.5	Processament dels núvols de punts .....	24
2.5.1	Presa de contacte amb arxius .....	24
2.5.2	Construcció del cub .....	25
2.5.3	Neteja dels murs .....	25
2.5.4	Càlcul de distàncies dels punts respecte a la façana.....	27
2.5.5	Rasteritzat de les façanes.....	28
2.5.6	Generació de l'Excel .....	31
2.6	Càlcul del volum i classificació de punts .....	31
2.6.1	Càlcul del volum .....	32
2.6.2	Classificació de les cel·les per columnes, files i quadrants.....	34
3	RESULTATS I DISCUSSIÓ .....	36
3.1	Caracterització del volum de vegetació de les façanes.....	36
3.1.1	Cara Est.....	36

3.1.2	Cara Oest .....	38
3.1.3	Cara Sud.....	40
3.2	Comparació entre cares dels volums calculats .....	42
3.3	Comparació entre sensors i relació de volums calculats per quadrants.....	43
3.4	Relació dels volums calculats amb LAI mesurat.....	46
3.5	Relació entre els volums calculats i les temperatures superficials .....	49
4	CONCLUSIONS .....	51
5	BIBLIOGRAFÍA.....	53

## Índex de figures

<b>Fig. 1</b> Espècie Boston Ivy plenament desenvolupada en l'enreixat modular de subjecció.....	13
<b>Fig. 2</b> Mètode directe per al càlcul del LAI en la part central de la cara est del cub de l'espècie Boston Ivy.....	14
<b>Fig. 3</b> Presa de dades amb el ceptòmetre. Mesura de la radiació solar que absorbeix la façana vegetada.....	14
<b>Fig. 4</b> Resultats de la mesura indirecta del LAI. Degut a la limitació del ceptòmetre, els valors LAI de la columna central de les 3 cares es van calcular fent una mitjana amb els valors veïns del mateix nivell. ....	15
<b>Fig. 5</b> Components principals Kinect v2 .....	19
<b>Fig. 6</b> Enreixat modular per a la subjecció de la vegetació en l'inici de les proves el 2012. Vegetació plenament desenvolupada l'estiu del 2015. ....	22
<b>Fig. 7</b> Els dos tipus de captures realitzades per la Kinect. Imatge completa de la façana vegetada i imatge de detall respectivament. Elements de referència: blocs grisos i element groc corresponent al centre de la façana.....	23
<b>Fig. 8</b> Muntatge utilitzat per a la presa de dades. Vehicle autònom amb la Kinect, focus per al control de la il·luminació i ordinador per al processament de la captació de dades. ....	23
<b>Fig. 9</b> Diferències de previsualització de totes les cares un cop obertes en el programa dels dos perifèrics. A l'esquerra, els arxius Kinect superposats un damunt de l'altre, a la dreta, els arxius lidar posicionats automàticament gràcies a la georeferenciació.....	25
<b>Fig. 10</b> Reorientació de les cares per a crear el cub a partir del vist en la fig.9 .....	25
<b>Fig. 11</b> Eina segment. Exemple on es mostra la polilínia (en verd) que realitza el retall dels punts que no presenten valor per a l'estudi. ....	26
<b>Fig. 12</b> Representació aproximada dels quadrants de la matriu utilitzats tant en estudis previs com en l'actual. ....	27
<b>Fig. 13</b> D'esquerra a dreta. Instal·lació real del sistema de subjecció de la planta, representació virtual de la façana i elements de referència (en gris) utilitzats en la Kinect per a posicionar la façana virtual a la distància corresponent. ....	27
<b>Fig. 14</b> Eina Point Picking per a determinar la dimensió de les malles del rasteritzat.....	29
<b>Fig. 15</b> D'esquerra a dreta: dimensions de cel·la de 0.1x0.1m, 0.08x0.08m i 0.045x0.045m. S'aprecia l'aparició de zones on no hi ha vegetació a mesura que es redueix la dimensió de la cel·la. ....	29
<b>Fig. 16</b> Finestra de l'eina raster on representa el nou núvol i es seleccionen els paràmetres que l'usuari vol que recullin els nous punts. ....	30
<b>Fig. 17</b> Arbre a mode d'exemple on apareixen els arxius que es van creant a mesura que s'aplica la metodologia. L'extensió seguida del guió, respon als processos aplicats.....	31
<b>Fig. 18</b> Representació de les distàncies considerades en els càlculs. ....	33
<b>Fig. 19</b> Representació de la distància dels punts respecte al mur de la cara est. Essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans.....	36
<b>Fig. 20</b> Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació de la cara est per cel·les.....	36
<b>Fig. 21</b> Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) del volum de vegetació per cel·la [m <sup>3</sup> ] de les diferents files, columnes i quadrants de la cara est. ....	37
<b>Fig. 22</b> Representació de la distància dels punts respecte al mur de la cara oest. Essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans. ....	38
<b>Fig. 23</b> Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació de la cara oest per cel·les. ....	38

<b>Fig. 24</b> Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) del volum de vegetació per cel·la [ $m^3$ ] de les diferents files, columnes i quadrants de la cara oest. ....	39
<b>Fig. 25</b> Representació de la distància dels punts respecte al mur de la cara sud. Essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans. ....	40
<b>Fig. 26</b> Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació de la cara oest per cel·les. ....	40
<b>Fig. 27</b> Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) del volum de vegetació per cel·la [ $m^3$ ] de les diferents files, columnes i quadrants de la cara sud. ....	41
<b>Fig. 28</b> Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes), desviació estàndard (línies blaves) i histogrames on es representa el volum per cel·la de les diferents façanes vegetades. ....	42
<b>Fig. 29</b> Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes), desviació estàndard (línies blaves) i histogrames on es representa el volum per cel·la de les façanes mesurat pels dos sensors. ....	43
<b>Fig. 30</b> Comparativa dels volums calculats pels dos sensors, en aquest cas de la cara Est. ....	43
<b>Fig. 31</b> Comparativa dels volums calculats pels dos sensors, en aquest cas de la cara Oest. ....	44
<b>Fig. 32</b> Comparativa dels volums calculats pels dos sensors, en aquest cas de la cara Sud. ....	44
<b>Fig. 33</b> Regressió lineal on es relacionen els volums dels diferents quadrants mesurats pels dos sensors. ....	45
<b>Fig. 34</b> Ajust del model lineal de la cara est entre volum i LAI de les columnes 1 i 3. ....	46
<b>Fig. 35</b> Ajust del model lineal de la cara oest entre volum i LAI de les columnes 1 i 3. ....	46
<b>Fig. 36</b> Ajust del model lineal de la cara sud entre el volum i LAI de les columnes 1 i 3. ....	47
<b>Fig. 37</b> Ajust del model lineal entre volum i LAI de la columna central de la cara est obtinguda per mitja d'un mètode destructiu. ....	47
<b>Fig. 38</b> Ajust del model lineal de les cares entre volum i LAI per quadrants de les columnes 1 i 3. ....	48

## Índex de taules

<b>Taula 1</b> Resultats de la mesura directa del LAI .....	14
<b>Taula 2</b> Exposició dels diferents sistemes de captació de dades.....	16
<b>Taula 3</b> Especificacions tècniques de la Kinect v2.....	20
<b>Taula 4</b> Formes en les que es distribuïran les cel·les obtingudes. ....	35
<b>Taula 5</b> Volum de vegetació per files, columnes i quadrants de la cara est en m <sup>3</sup> .....	36
<b>Taula 6</b> Taula de connexions on es comparen les mitjanes de volum de vegetació de la façana est per files, columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ , segons la prova de Tukey-Kramer HSD.....	37
<b>Taula 7</b> Volum de vegetació per files, columnes i quadrants de la cara oest en m <sup>3</sup> .....	38
<b>Taula 8</b> Taula de connexions on es comparen les mitjanes de volum de vegetació de la façana oest per files, columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències, mentre que lletres coincidents indiquen una semblança amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ , segons la prova de Tukey-Kramer HSD. ....	39
<b>Taula 9</b> Volum per files, columnes i quadrants de la cara sud en m <sup>3</sup> . ....	40
<b>Taula 10</b> Taula de connexions on es comparen les mitjanes de volum de vegetació de la façana es per files, columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ , segons la prova de Tukey-Kramer HSD.....	41
<b>Taula 11</b> Taula de connexions on es representa si hi ha alguna semblança volumètrica respecte un altra. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0.05$ , segons la prova Tukey-Kramer HSD. ....	42
<b>Taula 12</b> Volum de vegetació del quadrant 5 i temperatura als edificis de referència, l'edifici estudiat i diferència de temperatura assolida. ....	49
<b>Taula 13</b> Distància mitja de la vegetació respecte la paret dels quadrants 5 i 8 de cada cara... 50	
<b>Taula 14</b> Mitja de diferències de temperatures entre l'edifici vegetat i l'edifici de referència en un període de 13 dies.....	50

## 1 INTRODUCCIÓ

En els darrers anys, la demanda energètica ha augmentat dràsticament i seguirà fent-ho en un futur pròxim. Això entre altres coses denota que l'aprofitament que se'n fa no és del tot eficient. Si bé, segons estudis realitzats, és cert que s'ha produït una disminució en el consum energètic en el sector industrial, conseqüència de les millores en tècniques adoptades, en els sectors residencials i comercials s'ha experimentat un creixement preocupant.

Tothom és conscient del moment crític que s'està vivint a escala global referent al canvi climàtic i alguns sectors de la societat han començat a donar suport a iniciatives que pretenen minimitzar des de diferents vessants l'efecte que aquest pugui tenir, reduint un consum desmesurat que va en augment.

Una d'aquestes iniciatives, dins de la qual s'hi intentarà fer una petita aportació, respon al nom d'arquitectura sostenible, terme que correspon a la unió entre arquitectura i medi ambient. Aquesta unió es veu reflectida en la utilització, cada dia més palpable, de criteris sostenibles en el disseny, on els objectius prioritaris responen a la utilització de sistemes passius per a la disminució del consum energètic així com el tancament de cicles materials. Afegir també, dins d'aquests objectius, la incorporació de nous sistemes que permetin una integració real entre elements constructius i processos naturals relacionats amb el medi ambient.

Altres paràmetres que l'arquitectura sostenible té en compte són punts com les condicions climàtiques, hidrogràfiques, l'ecosistema que regeix en l'entorn i també, però no menys important, la implementació de fonts d'energia sostenible.

Tot i això, és conegut que existeixen altres vessants, algunes d'elles molt més puristes pel que fa a la idea principal, sostenibilitat. L'arquitectura d'energia zero, concepte conegut i explotat des de fa anys no és fins ara que comença a guanyar popularitat. Respon a un perfil més estricte, on l'objectiu radica en la construcció d'edificacions amb un consum energètic anual proper al 0 o fins i tot negatiu. L'obtenció d'aquests resultats s'aconsegueixen implementant la mateixa metodologia que en el concepte anterior, tot i que portant cadascun d'aquests punts fins a l'extrem per extraure tot el potencial que poden aportar.

### 1.1 Arquitectura vegetada en façanes

Un dels molts sistemes, emprats en l'arquitectura sostenible, és el de la vegetació integrada en les edificacions, que dit d'una altra manera, respon al nom d'arquitectura vegetada.

**Avui dia, la vegetació integrada en l'entorn construït, té una utilització que va més enllà de l'estètica i que respon a motius ecològics, funcionals, d'habitabilitat, econòmics, etc.**



Per tant, els estudis que aportin diferents punts de vista i processos per a una implementació d'aquesta són estrictament necessaris per a la seva proliferació i difusió. És conegut que certs sistemes que s'implementen en aquests tipus d'arquitectura, com els sistemes d'integració vegetada, resulten poc freqüents per la creença dels elevats costos d'instal·lació, de la incompatibilitat que un element viu presenta per mantenir una sèrie de característiques de manera uniforme al llarg del temps, així com de l'aspecte que presentaran les façanes dels edificis.

**Avui en dia, són molts els estudis que relacionen la presència d'aquests elements en el disseny d'edificis amb l'aportació de serveis a l'ecosistema urbà. (1)**

### 1.1.1 Beneficis de la vegetació present en façanes

En aquesta secció es relacionen una sèrie de punts pels quals la integració de vegetació en façanes d'edificis atribueix certs beneficis tant a escala urbana com d'edifici, essent el punt principal la utilització d'aquests com a sistemes passius per a l'estalvi energètic.

#### **Principals avantatges de la vegetació de façanes en edificis:**

- Regulació tèrmica :  
Les zones urbanitzades és conegut que presenten temperatures mitjanes més elevades que la dels camps circumdants. L'augment de la vegetació en zones sobreescalfades de la ciutat proporciona refrigeració en zones d'aire atrapat, així com la reducció de la calor reflectida. Per altra banda, aquests sistemes constructius són capaços de reduir la velocitat del vent i modificar el clima de l'espai intermedi ubicat entre la vegetació i l'estructura.
- Aïllament acústic :  
Les superfícies vegetades presenten una baixa reflectivitat acústica i altes propietats d'absorció. El soroll ambiental es veu atenuat entre uns valors de 2 a 5 dB proporcionant unes millors condicions d'habitabilitat.
- Purificació de l'aire:  
Durant el dia, les plantes extreuen diòxid de carboni, monòxid de carboni i altres toxines de l'aire durant el procés de la fotosíntesi, cosa que suposa una reducció significativa dels nivells de CO<sub>2</sub> en zones urbanes.
- Gestió de l'aigua de pluja:  
La massa vegetada pot reduir la gestió de les aigües pluvials. La utilitat d'aquest punt és més rellevant en zones antigues on els sistemes que desaigüen són ineficients, permetent la regulació i l'aprofitament en benefici propi.
- Augment de la biodiversitat:  
La implementació de diverses varietats de plantes contribueix a l'augment de la diversitat en l'entorn urbà. Això es manifesta no tan sols per l'augment del nombre d'espècies vegetals presents, sinó també pel suport que proveeixen, de refugi i aliment, per altres espècies animals com insectes i aus.

- Salut i benestar:

La vegetació presenta un impacte psicològic positiu, essent una estratègia fonamental en la cura de malalties relacionades amb l'estrès i estils de vida urbans desconnectats de la natura. A més a més, contribueix a una major productivitat en els llocs de treball.

Per les múltiples avantatges presents en aquests tipus de sistemes les investigacions estan enfocant els esforços en l'estudi d'aquests com a sistemes passius d'estalvi energètic. Estudis previs (2) han conclòs que els recobriments vegetals en edificis depenent de l'espècie instaurada permeten unes reduccions en consum energètic del 33 al 59% en estacions càlides. Altrament, s'ha enregistrat en aquests mateixos estudis una absorció i per tant una reducció de la temperatura interna de les edificacions on s'han realitzat els assajos d'entre 4,5 a 16,5 °C graus depenent de la cara.

Tot i aquests resultats, és conegut que al ser un organisme viu, aquests no es poden generalitzar a l'igual que es fa amb aïllants convencionals on, independentment de les condicions climàtiques, els resultats que obtinguts seran sempre els mateixos.

L'estudi que es presenta en aquest treball respon a la necessitat de buscar mètodes per mesurar de forma més acurada l'eficiència energètica resultant d'aplicar façanes vegetals. D'altra banda, que aquests mètodes de mesura han de ser capaços de proporcionar resultats instantanis en diferents instal·lacions i condicions climàtiques. En aquest treball es parteix de la hipòtesi que la densitat de fullatge de la façana vegetal, caracteritzada pel LAI (*Leaf Area Index*), és un paràmetre que es pot relacionar amb l'estalvi energètic que es busca. Per aquest motiu, cal trobar formes de mesura de la densitat del fullatge de forma fàcil i precisa i establir una vinculació a l'estalvi proporcionat.

## 1.2 Contribució de l'agricultura de precisió en la caracterització del fullatge

L'objectiu de l'agricultura de precisió resideix en maximitzar la producció agrícola, donant resposta a l'increment de necessitats alimentàries a causa d'una població en creixement, preservant simultàniament el medi ambient i optimitzant els recursos disponibles.

Aquest propòsit ha generat nombrosos estudis en els quals s'han implementat les tecnologies més innovadores fins al moment, com sensors ultrasònics i de base fotònica, per tal d'assolir els objectius esmentats anteriorment. D'aquests estudis, hom n'ha adquirit una sèrie de procediments molt útils per al propòsit d'aquest treball que aquí es presenta. Estudis, realitzats per la Universitat de Lleida, on s'han centrat en dues metodologies, la basada en mapes digitals d'informació i la basada en sensors i en temps real.

L'agricultura de precisió basada en mapes digitals d'informació, es pot resumir com un procés de dues etapes. En la primera part es fa una presa de dades de la parcel·la ha analitzar i de la variabilitat espacial (clima, topografia, organismes,...) per tal d'obtenir un

mapa anomenat mapa d'actuació. Mitjançant la col·laboració d'aquest últim amb un sistema de georeferenciació i els aparells d'actuació pertinents, s'aplicarà en major o menor mesura l'acció que es vulgui dur a terme en el terreny per tal d'optimitzar les operacions requerides.

Per contra, l'agricultura de precisió basada en sensors i temps real, esdevé un procés en el qual no s'utilitzen sistemes de georeferenciació, ja que com el nom indica, es fa la presa de decisió i actuació en temps real a mesura que s'analitza el terreny (3).

Els sensors de proximitat entren en escena com a instruments capaços de capturar de forma puntual els valors de l'índex de vegetació d'una planta o part d'aquesta així com la caracterització dels cultius arboris. Aquests sensors permeten obtenir models tridimensionals de les plantacions a partir de la mesura de les distàncies del sensor a la vegetació. Els estudis realitzats pel GRAP (Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió) s'han centrat en la caracterització de plantacions per mitjà d'aquests sensors, on han passat de mesurar arbres individualment a poder caracteritzar files i parcel·les en 3D. D'aquests estudis, hom n'ha extret punts de partida per al projecte dut a terme en aquest treball.

### 1.3 Antecedents de recerca

#### 1.3.1 Importància del LAI

El paràmetre més utilitzat per a caracteritzar la massa de fulla d'una planta és l'índex d'àrea foliar (LAI o *leaf area index*, en anglès). Tradicionalment, el concepte de LAI ha estat utilitzat en l'agricultura i l'ecologia per a mesurar el desenvolupament de collites, per a fer comparacions entre plantes i per a planificar el reg durant el desenvolupament de la collita (4).

Tot i que alguns autors anteriors han utilitzat el concepte de LAI amb l'objectiu de caracteritzar el potencial dels sistemes de vegetació verticals (façanes verdes) com una eina passiva per estalviar energia, després d'una revisió de literatura, s'ha detectat una manca de coneixement sobre el concepte del LAI aplicat a aquest propòsit. Així, assumptes clau com la manera de mesurar el LAI en els VGS (façanes vegetades o *vertical greenery systems* en anglès), la relació entre el LAI i els estalvis d'energia proporcionats per la façana verda no està encara resolt, fet que justifica realitzar recerca més profunda en aquesta direcció.

Els paràgrafs següents resumeixen els descobriments principals dels escassos autors anteriors que han aplicat el concepte del LAI als VGS.

Wolter et al. (2009) va dissenyar una façana experimental de doble pell de vegetació, feta amb un suport d'enreixat d'acer i heura (*Hereda helix*) per tal d'estudiar el LAI en les façanes verdes. Segons aquests autors, en el cas dels sistemes verticals de vegetació, el LAI descriu una relació entre l'àrea de fulla i els metres quadrats de façana en comptes de la relació entre l'àrea de fulla i els metres quadrats de sòl com de costum p. ex. per l'aplicació en cobertes vegetals. A més, és necessari tenir en compte el fet que en una

façana verda els valors del LAI canvien amb l'alçada. Tot i que l'estudi de Wolter no considera els beneficis tèrmics de les façanes verdes, com que el LAI té una influència directa en la densitat de fullatge, aquest valor pot ser enllaçat al comportament tèrmic de sistemes verds. La mitjana de LAI mesurada a cada mostra al final del període del test va ser entre 7 (a l'est) i 8.51 (al sud). Aquests índexs d'àrea de la fulla són equivalents o fins i tot més alts que aquelles façanes convencionals d'heura (2.6–7.7). (5)

Wong et al. (2009) va dur a terme un interessant estudi sobre els efectes dels VGS en la temperatura i el consum d'energia d'edificis. Amb aquest propòsit, els autors van intentar establir una correlació entre el LAI i el coeficient d'ombra (la proporció entre la radiació solar sota la planta i la paret) basat en les mesures dutes a terme en un muntatge experimental en el qual es van comparar vuit VGS diferents. Tot i que es va trobar una correlació entre aquests dos paràmetres, no poden ser generalitzats ni tampoc es poden considerar concloents, perquè les mesures fetes van ser poques i en sistemes de construcció molt diferents (alguns d'ells eren façanes verdes i altres eren parets verdes). La tendència general va ser l'esperada, per exemple, una radiació solar baixa a sota la planta significa que la planta ombreja la paret eficaçment. En aquest estudi, tot i que es descriu l'equipament utilitzat per mesurar el LAI i el coeficient d'ombra (radiació solar), no s'especifica la metodologia ni la veracitat de les dades subministrades. (6)

Ip et al. (2010), va proposar un coeficient que intentava caracteritzar l'efecte de l'ombra d'una planta d'enfiladissa sobre el seu creixement anual i cicle de marciment. L'estudi es va basar en dades d'un experiment conduït durant 2003 i 2004. En aquell experiment, una façana verda de doble pell feta amb un enreixat metàl·lica i una enfiladissa Virginia (*Parthenocissus quinquefolia*) es va col·locar en una finestra d'un edifici d'oficines situat a Brighton (Regne Unit). Una contribució molt interessant d'aquest estudi és l'esforç per caracteritzar l'efecte d'ombra d'una façana verda de doble pell. Amb aquest objectiu, es van dur a terme fins a 2000 mesures sota la façana verda, en referència a la radiació rebuda davant de la façana. En aquest experiment, les mesures de la radiació solar es van dur a terme amb el solarímetre en posició vertical, fet que, segons els autors, implica la necessitat de fer correccions en els càlculs per tal de considerar només el component horitzontal de la radiació que és perpendicular a la façana. (7)

Susurova et al. (2013) va definir un model matemàtic per caracteritzar els efectes tèrmics de les plantes sobre la transferència de calor a través de les façanes fetes amb materials de construcció. La densitat de fulla, caracteritzada pel LAI, apareix entre els diversos paràmetres utilitzats pel simulacre, sent un dels més influents reduint la temperatura a la superfície de la paret de l'edifici. Tanmateix, en aquest estudi, el LAI es va calcular de manera aproximada mesurant l'àrea d'una sola fulla típica i tenint en compte l'àrea d'heura en una fotografia d'una façana verda tradicional sota estudi. (8)

Scarpa et al. (2014) va proposar un model matemàtic sobre el comportament energètic de les parets vives. Un altre cop, el LAI va ser un paràmetre important a considerar en el model teòric. En aquest estudi els dos valors utilitzats pel LAI van ser de 3 en una paret viva feta amb diferents espècies d'arbust i de 5 per una paret viva que utilitza herba com a vegetació, sorprenentment més alt que el primer. Aquests valors de LAI vénen d'un

estudi anterior conduït pels autors, els quals es van obtenir mesurant el LAI sota els arbusts col·locats en posició horitzontal, en el viver.

D'aquesta revisió de la literatura pot ser conclòs que el LAI és un paràmetre clau per caracteritzar la densitat de fullatge i conseqüentment el comportament tèrmic dels VGS i especialment de les façanes verdes, a causa de la seva gran influència en l'efecte d'ombra. No obstant això, hi ha una manca no només de dades útils d'aquest paràmetre, sinó també de la metodologia adequada per mesurar el LAI per aquests propòsits. Així, al llarg d'aquests anys d'estudis no s'ha establert una metodologia comuna per mesurar i utilitzar el LAI en els VGS. A més a més, el LAI de les diferents espècies utilitzades pels VGS, la influència de clima en el desenvolupament d'aquestes espècies i conseqüentment en valors de LAI, les variacions de LAI segons l'alçada, són qüestions encara per contestar. Tenir valors reals de LAI per plantes diferents en climes diferents, i enllaçar aquests valors a estalvis d'energia, pot ser informació adequada per fer front a les necessitats de disseny durant la fase de projecte de l'edifici. (9)

Els actuals estudis tenen com a objectiu l'estudi del potencial dels VGS com sistemes passius per l'estalvi d'energia en edificis, sent un dels focus principals mesurar la influència de la densitat de fulla, mitjançant el valor de LAI, en el comportament tèrmic de tot el sistema.

Ja que aquesta densitat de fulla depèn de la tipologia de VGS, del tipus de planta, així com de la seva etapa de desenvolupament i de les condicions climàtiques, és necessari d'establir metodologies de treball senzilles i generalitzables, per tal de facilitar la participació i la comparació de dades dels estudis fets per tot el món.

En una primera fase d'aquesta recerca, es va controlar al llarg d'un any sencer una façana verda de doble pell, situada a l'estació experimental de Puigverd de Lleida del grup de recerca GREiA (Grup de Recerca en Energia i Intel·ligència Artificial). La façana verda consisteix en un suport d'acer d'enreixat modular amb plantes enfiladisses de la Glicina (*Wisteria sinensis*). Entenent el factor de transmissió de llum de la façana verda de doble pell com la proporció entre la quantitat de llum de l'espai intermedi i la quantitat de llum de l'exterior, aquest valor varia d'entre un 0,04 al juliol, a un 0,37 a l'abril, durant l'estació amb el fullatge plenament desenvolupat. La temperatura de la superfície de la paret exterior de l'edifici darrere d'una àrea coberta va ser 5,5°C més baixa que en una àrea exposada. Aquesta diferència va ser més alta a l'agost i al setembre, assolint valors màxims de 15,2°C la façana Sud-Oest al Setembre. (10)

A més a més, en un altre estudi experimental, es va determinar la capacitat de transmissió de quatre espècies de plantes diferents ben adaptades al clima mediterrani continental mitjançant una experimentació senzilla. Les espècies escollides van ser l'heura (*Hedera helix*) i el lligabosc (*Lonicera japonica*), com a plantes perennes, i la parra verge (*Parthenocissus quinquefolia*) i les Clematis (*Clematis* sp.), com a plantes caducifòlies. Els resultats d'aquest experiment van mostrar uns valors de factor de transmissió de llum de 0,15 per la parra verge, 0,18 pel lligabosc, 0,14 per les Clematides i 0,20 per l'heura. Aquests valors són comparables als millors valors del factor d'ombra que es poden

obtenir utilitzant les barreres artificials per l'orientació Sud que es proposen en el Codi Tècnic de l'Edificació (CTE). Per tal de mesurar els estalvis d'energia associats a aquest efecte d'ombra, es va moure la façana verda formada per aquestes quatre espècies a un cub experimental en el qual es va confirmar la gran capacitat de la façana verda per interceptar la radiació solar, amb reduccions de la temperatura de la superfície de paret exterior de fins a 14 °C al Juliol. (11)

Tenint en compte aquestes positives experiències prèvies, i en vista del potencial que tenen les façanes verdes per generar ombra als edificis, es va construir un nou cub experimental el 2012 amb façanes vegetades cobrint les parets est, oest i sud (Fig. 1) i (Fig. 6). Es van dur a terme diferents experiments amb l'objectiu de mesurar el LAI i relacionar-lo amb l'efecte ombra i amb els estalvis energètics que se'n deriven.



**Fig. 1** Espècie Boston Ivy plenament desenvolupada en l'enreixat modular de subjecció.

### 1.3.2 Descripció de les mesures del LAI

El LAI es pot mesurar amb metodologies directes o indirectes. El mètode directe, que és el més acurat per mesurar el LAI, implica collir totes les fulles del sistema, corresponents a un metre quadrat de superfície, i mesurar l'àrea de cada fulla. Per contra, els mètodes indirectes es basen en la mesura de paràmetres que es poden relacionar directament amb el LAI com la quantitat de llum absorbida o reflectida per la planta.

Per caracteritzar la densitat de les fulles de la façana verda de l'estudi i per trobar una relació entre aquesta densitat foliar i l'estalvi d'energia aconseguit a causa de l'efecte d'ombra, es van dur a terme diferents accions.

Les primeres accions van tenir lloc durant l'estiu de 2013. D'una banda, es va mesurar a diferents parts de la façana la intercepció de la radiació solar deguda a les plantes, amb l'objectiu de caracteritzar-la per orientacions i altures. D'altra banda, es va fer una mesura directa del LAI, és a dir destructiva, a la façana est, la més representativa en el moment de l'estudi, ja que era la que estava més desenvolupada. En un segon període, durant l'estiu de 2015, es va realitzar la mesura indirecta del LAI mitjançant un ceptòmetre en les façanes est, sud i oest. (12)



### Mesura directa del LAI (2013)

Per tal de mesurar directament el LAI d'aquesta façana verda utilitzant un mètode destructiu es van recollir totes les fulles dels tres metres quadrats centrals de la façana Est. Es va mesurar l'àrea de totes les fulles individualment (Fig. 2) i després es va calcular l'àrea total de fulla per metre quadrat donant els resultats de la Taula 1.



Fig. 2 Mètode directe per al càlcul del LAI en la part central de la cara est del cub de l'espècie Boston Ivy.

Taula 1 Resultats de la mesura directa del LAI

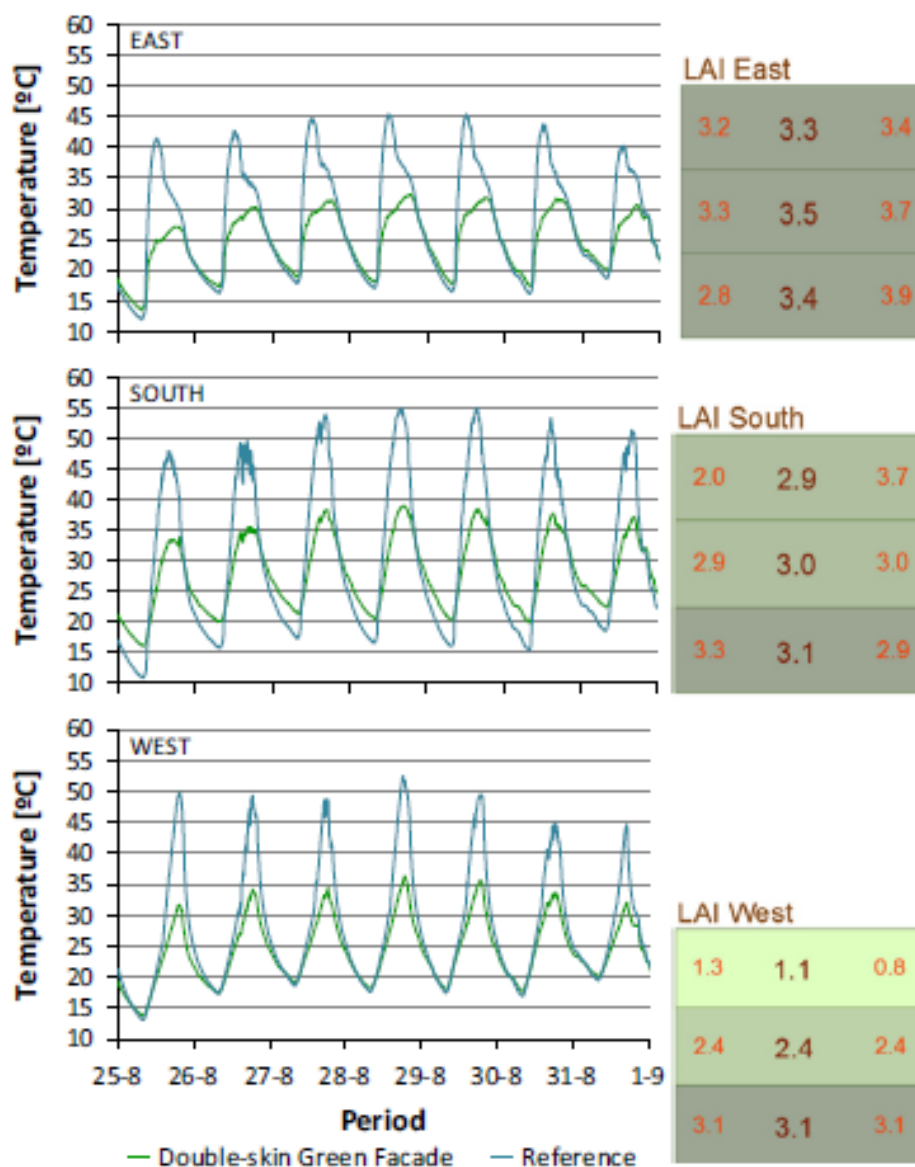
	Nombre de fulles	Àrea mitjana de fulla (cm2)	Àrea de fulla mesurada (cm2)	LAI
Quadrant superior	1387	15,08	20914,64	2,1
Quadrant central	1224	26,29	32185,04	3,2
Quadrant inferior	994	39,6	39283,75	3,9

### Mesura indirecta del LAI (2015)

A l'estiu de 2015, amb la façana verda en perfecte estat, es va mesurar indirectament el LAI utilitzant un ceptòmetre Sunfleck PAR (*photosynthetically active radiation en anglès*) (Fig. 3). Amb l'objectiu de caracteritzar el LAI per orientació (Est, Sud i Oest) i per a diferents nivells d'alçada (superior, central i inferior), es van realitzar un total de 10 repeticions de lectura darrere de la façana verda, en sis punts diferents per orientació d'acord amb l'esquema de la Fig. 3. A més, també es va fer la lectura PAR a l'exterior de la façana verda. Amb els valors d'aquestes lectures davant i darrere de la vegetació, es va poder calcular el LAI (Fig. 4).



Fig. 3 Presa de dades amb el ceptòmetre. Mesura de la radiació solar que absorbeix la façana vegetada.



**Fig. 4** Resultats de la mesura indirecta del LAI. Degut a la limitació del ceptòmetre, els valors LAI de la columna central de les 3 cares es van calcular fent una mitjana amb els valors veïns del mateix nivell.



### 1.3.3 Comparativa entre sensors

A continuació, es mostren els sensors amb capacitat per realitzar funcions similars tot afegint els avantatges i desavantatges que presenten (Taula 2). Tot i la varietat, l'objectiu de l'estudi es centra en la utilització de dos d'aquests, el sensor Kinect i un sistema Lidar (*Light Detection and Ranging*), ja que són els que l'equip del GRAP (*Grup d'investigació en AgròTICA i Agricultura de Precisió*) va utilitzar per la presa de dades. La següent taula està adaptada de l'article de mètodes i aplicacions per la caracterització geomètrica de cultius d'arbres en activitat agrícoles (13).

**Taula 2** Exposició dels diferents sistemes de captació de dades.

Tipus de sensor	Principi físic i característiques del sensor	Avantatges	Desavantatges
Sistemes radar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilitza la radiació electromagnètica (EM) en el rang de microones.</li> <li>- Esta basat en la mesura del temps transcorregut o del desplaçament de fase del pol EM entre l'emissor i l'objectiu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relativament independent de les condicions atmosfèriques.</li> <li>- Mesura les diferències en l'estructura del dosser a nivells a gran escala</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resolució espacial deficient per aplicacions en l'agricultura.</li> <li>- Mesura precisa de les característiques 3D del dosser, com altura i volum, el model espacial 3d del arbres roman inviable pel moment.</li> </ul>
Mètode fotogràfic	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les càmeres d'imatge digital, reben la llum de la superfície de l'objecte i la converteixen en un senyal elèctric utilitzant un dispositiu d'acoblament de carrega (CCD) o un semiconductor complementari d'òxid de metall (CMOS)</li> <li>- La fotografia hemisfèrica digital utilitza càmeres digitals amb objectius d'ull de peix.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les càmeres digitals son un instrument de baix cost fàcil d'utilitzar.</li> <li>- Algunes característiques de les plantes tals com alçada, volum, índex d'àrea foliar (LAI) i l'índex d'aglomeració foliar pot ser estimat amb una precisió raonable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'avaluació de la geometria de la planta és un procés laboriós i lent.</li> <li>- No és útil per aplicacions en temps real 3D.</li> <li>- Es requereix una calibració prèvia de la càmera.</li> <li>- El model 3D de la planta no s'obté directament, però si amb una post producció posterior amb algorismes.</li> </ul>
Sensor llum	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es basen en el seguiment de les finestres d'ombra d'un arbre a través d'un sistema de xarxa de sensors de llum al sol</li> <li>- Utilitza tècniques de tomografia per obtenir característiques dels arbres analitzant les diferents imatges d'ombra adquirides en les diverses posicions del sol.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema a mida de cost reduït.</li> <li>- L'escàner es pot ajustar a diferents estands.</li> <li>- Es poden obtenir característiques geomètriques del dosser com mida, forma i secció exposada al sol i la fracció d'ombra i àrea del dosser il·luminada per el sol.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restringit en dies solejats, amb un cel clar i poc vent.</li> <li>- La presa de dades requereix de molt temps.</li> <li>- El model 3D de les plantes no s'obté directament però si per un post processat posterior.</li> </ul>
Estereovisió	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proporciona una imatge 3D combinant dos imatges monoculars de camp preses simultàniament utilitzant una càmera digital binocular.</li> <li>- El còmput d'algorismes és necessari per convertir les coordenades dels objectes presos per la càmera en coordenades del món real.</li> <li>- El resultat de les mesures és un núvol de punts 3D amb un grau de detall proporcional a la resolució de les imatges adquirides.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- És la tècnica que proporciona les imatges 3D de plantes més reals. Molt similars a la visió de l'ull humà.</li> <li>- Mesura directament l'estructura vegetal 3D incloent paràmetres físics que són importants per al control de la producció com el volum i dimensió.</li> <li>- Es pot aportar informació de la anàlisi espectral.</li> <li>- Suporta la adquisició d'imatges 3D de sistemes d'informació geogràfica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ofereix menys precisió que els sistemes làser i necessita d'un ajust apropiat.</li> <li>- Perd efectivitat sota certes condicions climatològiques com per exemple en canvis lumínics.</li> <li>- Quan es processen múltiples imatges a la vegada, el pes de les dades augmenta considerablement complicant el maneig i l'emmagatzematge de la informació 3D i requerint processament llarg. El problema empitjora quan es requereix de processament a temps real.</li> </ul>
Sensor ultrasònic	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilitza la transmissió d'ones sonores en l'aire a freqüències inaudible per a l'home.</li> <li>- Es basa en determinar el temps que tarda l'ona ultrasònica des del punt d'emissió fins a l'objecte de detecció</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La robustesa i el baix preu el fan adequat per a l'agricultura de precisió.</li> <li>- Relativament fàcil d'implementar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- És necessari l'ús de moltes unitats per cobrir un terreny agrícola.</li> <li>- El seu inconvenient principal és el gran angle de divergència en emissió. Això limita la resolució i la precisió de les mesures realitzades.</li> </ul>

Sensor Lidar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es basa en la mesura de la distància des d'un emissor làser fins a un objecte o superfície utilitzant un pols de feix làser.</li> <li>- S'utilitzen dos mètodes de mesura: <ul style="list-style-type: none"> <li>(i) El temps de vol Lidar (<i>time of flight</i>), mesura el temps en que un pols làser tarda en viatjar entre el sensor i l'objecte.</li> <li>(ii) Mesurament de desplaçament de fase, on mesures la diferència de fase entre el feix làser emès i el reflectit.</li> </ul> </li> <li>- El sistemes Lidar poden emetre en una gran varietat de longitud d'ona: ultraviolat (UV), visible (VIS) o infraroig proper (NIR).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta velocitat de mesura. Permet obtenir punts de núvols 3D ràpidament que, mitjançant l'aplicació d'algoritmes apropiats, fa possible la reconstrucció digital dels objectes de forma precisa.</li> <li>- Alta precisió. Això permet quantificar variacions espacials i temporals, que és un aspecte important en l'estructura vegetada i un avanç significatiu pel que fa a altres mètodes.</li> <li>- Els sistemes Lidar poden generar imatges 3D digitalitzades de cultius amb suficient precisió per a la majoria d'aplicacions agrícoles d'on es pot obtenir l'alçada, amplada, volum, índex d'àrea foliar i la densitat d'àrea foliar.</li> <li>- Comparat amb els sistemes 3D Lidar convencionals, els 3D Flash Lidar, tenen un sistema de mesura més ràpid, són més petits i més barats tot mantenint la mateixa precisió.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitacions en entorns de pols, boira i humitat.</li> <li>- L'alt cost de motoritzat 3D limiten el seu ús.</li> <li>- L'estimació del volum es molt sensible a errors en la determinació de la distància entre el lidar i el blanc i en la determinació de l'angle d'orientació d'aquest.</li> <li>- Paral·lelament, els escàner Lidar motoritzats terrestres, han d'incloure dispositius addicionals o processos per controlar o estimar i corregir aquestes fonts d'error.</li> <li>- En determinades circumstàncies, la mida dels fitxers de dades pot ser considerable, complicant el maneig i emmagatzematge d'aquesta informació 3D i requerint de llargs temps de processat. El problema pot incrementar-se, quan es requereix processat a temps real.</li> </ul>
Sensor Kinect	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Basa el seu funcionament en la mesura de la distància des d'un emissor làser fins a objectes utilitzant una càmera de profunditat.</li> <li>- Incorpora una càmera RGB destinada a incorporar la dada de color als núvols de punts 3D.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta velocitat de mesura. Tant la captació com el processament de dades es realitza de manera instantània recreant objectes precisos.</li> <li>- Alta precisió. Al igual que el Lidar, permet quantificar les variacions presents en la vegetació.</li> <li>- La digitalització d'objectes en imatges 3D, en el nostre cas de massa vegetada, a més a més d'obtenir les mateixes dades que en l'aparell anterior, aporta la dada de color.</li> <li>- El gran avantatge, és la lectura i processament instantani i un preu amb el que cap de les eines restants pot competir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitacions del sensor IR en condicions lumíniques molt elevades i del conjunt amb entorns de pols i boira.</li> <li>- Presenta un rang d'actuació angular i un abast molt reduït. Per pal·liar el problema s'incorporen elements motoritzats amb sistemes i processos addicionals per a recrear i reconstruir les fotografies en una mateixa. Aquest fet requereix de llargs temps de processament.</li> </ul>

## 1.4 Objectiu

### 1.4.1 Objectiu general

L'objectiu general d'aquest treball de final de grau, és la cerca d'una metodologia la qual permeti caracteritzar i estudiar tridimensional-ment un sistema vertical de vegetació.

### 1.4.2 Objectius parcials

- Aprenentatge del programa CloudCompare per al processament de núvols 3D.
- Obtenció del volum de vegetació del sistema vertical de vegetació mitjançant el sensor Microsoft Kinect v2 (càmera RGB-D).
- Establir una relació entre el volum de vegetació obtingut en el pas previ amb l'índex d'àrea foliar per contrastar la precisió del mètode utilitzat en aquest treball.
- Establir una relació entre el volum de vegetació de les façanes estudiades i les temperatures preses en un estudi previ. Així doncs, coneguda la relació entre aquests dos paràmetres també es podrà conèixer l'estalvi energètic que proporciona un sistema vertical de vegetació.
- Comparar els resultats obtinguts entre el sistema d'escaneig basat en el sensor Microsoft Kinect2 i el basat en el sensor Lidar Hokuyo UTM30-LX-EW per tal de veure si s'obtenen resultats equivalents.

## 2 MATERIALS I MÈTODES

### 2.1 Hardware

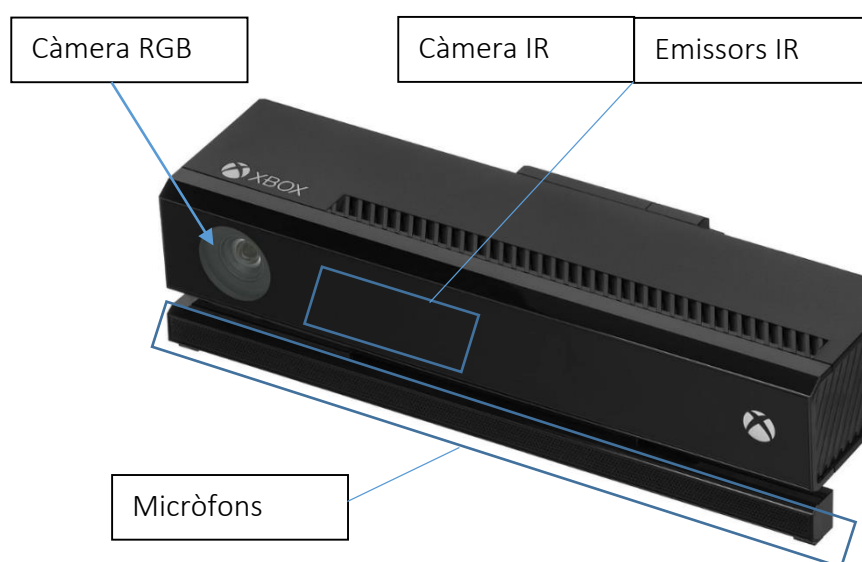
#### 2.1.1 Descripció del sensor Kinect v2

Per a la presa de dades s'ha utilitzat un sensor Microsoft Kinect v2, aparell de baix cost, el qual sembla ser un gran candidat a rellevar dins la robòtica a diferents sensors 3D actualment utilitzats però que presenten una menor versatilitat i major cost que la Kinect.

El reduït cost del sensor Kinect (200-300 €) es deu al fet de ser un dispositiu orientat inicialment a la industrial dels videojocs, així com a la seva producció en massa i comercialització a escala mundial en els darrers d'aquests anys (diverses desenes de milions d'unitats venudes). En el cas que ens ocupa, un dels objectius serà observar si la Kinect pot suplir el sistema Lidar, sensor habitualment utilitzat per la caracterització remota de la vegetació, però que és substancialment més costós (>5000 €). A més del seu cost inferior, el sensor Kinect proporciona informació de distància i de reflectivitat (igual que el Lidar), però també dades d'imatge RGB (a diferència del Lidar).

La introducció de sensors de baix cost com la Kinect suposaria en l'àmbit de la recerca, un recurs abastable per la gran majoria fet que repercutiria directament en més estudis i majors coneixements sobre les possibilitats d'aquesta.

Es procedirà a fer un breu resum del principi de funcionament del perifèric, així com de la metodologia seguida per la captació de dades. La Kinect, controlador perifèric de Xbox i Windows, compta amb 4 components principals els quals s'indiquen en la següent imatge (Fig. 5):



**Fig. 5** Components principals Kinect v2

El sensor Kinect utilitzat en aquest treball és la segona versió de la càmera de profunditat (RGB-Depth) desenvolupada per Microsoft l'any 2010. La primera versió de la Kinect era un sensor basat en l'emissió de llum estructurada, que era projectada dins el camp de visió de la càmera. La segona versió, emprada aquí, és un sensor basat en el principi de temps de vol (TOF: *time-of-flight*).

El seu funcionament es basa en l'emissió de polsos de llum infraroja (IR) i la captació del retard temporal existent entre aquesta emissió i la seva captura amb la càmera IR. Aquest retard proporciona informació de profunditat per cadascun dels punts emesos, obtenint informació 3D del blanc que s'està mesurant. Així mateix, la Kinect incorpora una càmera RGB convencional, que captura imatges del blanc objecte d'estudi, possibilitant així la incorporació de la dada de color en els punts del núvol a estudiar.

La càmera IR únicament treballa correctament sota unes condicions lumíniques molt concretes. Es deu al fet que l'aparell va ser concebut per a utilitzar-se en espais tancats o interiors (videojocs) i en exteriors, únicament pot utilitzar-se amb condicions de baixa lluminositat (cap al tard o de nit). Més endavant aprofundirem sobre el tema i els problemes que això pot ocasionar.

Tan bon punt aquesta informació es recopila, es processa i s'envia al CloudCompare, programa de processament i edició de núvols 3D, per al posterior anàlisi i estudi.

#### 2.1.1.1 Característiques tècniques

A la [Taula 3](#), s'aporten les dades tècniques que definiran en major o menor mesura la qualitat de les mesures captades per a l'estudi. La taula compta amb punts referents a la finalitat per la qual va ser concebuda.

**Taula 3** Especificacions tècniques de la Kinect v2

	Kinect v2
<i>Càmera a color</i>	1920x1080 @ 30 fps
<i>Càmera de profunditat</i>	512 x 424 @ 30 fps
<i>Sensor</i>	Time of Flight (ToF)
<i>Distància màxima de profunditat</i>	~4.5 m
<i>Distància mínima de profunditat</i>	~0.5 m
<i>Vista de camp horitzontal</i>	70 graus
<i>Vista de camp vertical</i>	60 graus
<i>Màxima freqüència de mesura</i>	5-10 Hz

## 2.2 Programari

### 2.2.1 Visualització i edició dels núvols de punts

El software emprat per a processar les dades captades pel perifèric, en el cas que ens ocupa el sensor Kinect, és conegut com a Cloud Compare.

Aquest programari de codi obert, iniciat l'any 2003 però presentat per al seu ús el 2009, és un software de processament i edició de núvols 3D. Aquest, és actualitzat anualment

incorporant funcionalitats noves, ja que és un projecte de codi obert independent i software lliure.

La finalitat original del programa, era la de comparar núvols de punts 3D d'alta densitat generats per escàners làser, entre ells o amb malles triangulars per tal de detectar diferències entre dues mesures d'un mateix objecte o grups d'objectes.

Això s'aconsegueix gràcies a l'aportació de diferents eines bàsiques per a l'edició i renderitzat manual. L'evolució d'aquest, també ha permès la incorporació d'algoritmes avançats de processament, alguns dels quals han servit al propòsit del treball. La utilització d'aquests nous algoritmes i eines es fa possible gràcies al dossier digital en el qual s'hi fan breus resums del contingut. Les possibilitats del programa, referents a l'extracció d'informació, són bastant àmplies.

### 2.2.2 Càlculs generals

Per a calcular els volums de vegetació es va fer servir el programa MS Excel 2013 (Microsoft, Redmont, WA, USA).

### 2.2.3 Tractament estadístic

El tractament estadístic es va realitzar amb el programa estadístic JMP PRO 13 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

Una vegada calculats els volums de vegetació per cada cara, es va procedir a comparar les mitjanes obtingudes per a determinar si hi havia diferències significatives entre elles. La prova que es va aplicar va ser la de Tukey-Kramer amb un nivell de significació,  $\alpha$ , de 0,05. Es va escollir aquesta prova per ser àmpliament utilitzada en la bibliografia en àmbits similars a l'estudiat.

Les comparacions múltiples de les mitjanes permeten examinar quines mitjanes són estadísticament diferents i estimar el grau de diferència. Es pot avaluar la significació estadística de les diferències entre les mitjanes usant un conjunt d'interval de confiança, un conjunt de proves d'hipòtesis o tots dos. Els intervals de confiança permeten avaluar la significació pràctica de les diferències entre les mitjanes, a més de la significació estadística. Com és habitual, la hipòtesi nul·la de no diferència entre mitjanes es rebutja si, i solament si, l'interval de confiança no conté el zero.

El mètode de Tukey s'utilitza per crear intervals de confiança per a totes les diferències en parelles entre les mitjanes dels nivells dels factors mentre controla la taxa d'error per família en un nivell especificat. És important considerar la taxa d'error per família quan es fan comparacions múltiples, perquè la probabilitat de cometre un error de tipus I per a una sèrie de comparacions és major que la taxa d'error per a qualsevol comparació individual. Per contrarestar aquesta taxa d'error més elevada, el mètode de Tukey ajusta el nivell de confiança de cada interval individual perquè el nivell de confiança simultani resultant sigui igual al valor que s'especifiqui. Es van comparar les següents mitjanes:

- Per a cada cara: per alçades, per amplades i per quadrants
- Entre cares per cada sensor
- Entre sensors

## 2.3 Escaneig experimental de les façanes

L'adquisició de les dades es va realitzar a l'estació experimental de Puigverd de Lleida el 19 de setembre de 2016. El sistema vertical de vegetació, present en les cares est, oest i sud del cub objecte d'estudi (Fig. 6 dreta) estava format per l'espècie Boston Ivy (*Parthenocissus Tricuspidata*), planta d'una adaptació consolidada en un clima mediterrani continental com aquest. La vegetació va recobrir el cub per mitjà d'un enreixat modular prèviament instal·lat a 20 cm de distància respecte de la paret, tal com es veu en la Fig. 6(esquerra). En el moment de la presa de dades, la planta es presentava en el seu màxim esplendor i per tant, en el punt òptim com a sistema passiu per a l'estalvi energètic. Posteriorment, van col·locar diversos sensors de temperatura centrats en la part externa (arrebossat de ciment) de les diferents cares. Aquest procediment es va dur a terme en el cub vegetat i en un cub nu, utilitzat com a element de referència per tal de conèixer, entre altres punts, la reducció experimentada de les temperatures (Secció 3.5 Relació entre els volums calculats i les temperatures superficials).



**Fig. 6** Enreixat modular per a la subjecció de la vegetació en l'inici de les proves el 2012. Vegetació plenament desenvolupada l'estiu del 2015.

Com ja s'ha comentat anteriorment, l'altre sensor utilitzat en aquests assajos va ser un sistema Lidar (*light detection and ranging*), que realitza la presa de dades en moviment gràcies a una plataforma autopropulsada i posiciona les mesures gràcies a la informació subministrada per un sistema satèl·lit de navegació RTK-GNSS (*real-time kinematic global navigation satellite system*). A diferència del lidar, el sensor Kinect fa la mesura en un mode estàtic, similar al procediment que segueix una càmera fotogràfica convencional.

Els components hardware que conformaven l'equip de captació de dades eren: una Kinect connectada via port USB a un portàtil i una plataforma autopropulsada híbrida (Fig. 8). Pel que fa al software, mitjançant un programa desenvolupat en llenguatge C+, es realitzava l'adquisició de dades. Aquest programa permetia a l'usuari ajustar el camp de visió (FOV: *field of view*) de la Kinect tant en horitzontal com en vertical, així com la freqüència d'adquisició de dades i mostra els quadres de vídeo de les escenes mesurades en RGB i IR.

El sistema Lidar, com ja s'ha dit, es caracteritzava per realitzar diferents passades gràcies al vehicle autònom, recreant a mesura que es desplaça un mapa virtual del qual el làser,



prèviament configurat, captava i georeferenciava les mesures gràcies a la informació de posició que subministrava el sistema RTK-GNSS. Per contra, la Kinect, per mitjà del vehicle autònom es va col·locar centrada en la cara per posteriorment realitzar la captura. En el cas que s'exposa, es van realitzar un seguit de fotografies, concretament 6 en cadascuna d'elles (Fig. 7): 3 de detall a una distància d'entre 2,15 i 2,8 metre i 3 completes a 4 metres.



**Fig. 7** Els dos tipus de captures realitzades per la Kinect. Imatge complerta de la façana vegetada i imatge de detall respectivament. Elements de referència: blocs grisos i element groc corresponent al centre de la façana.

Realitzar mesures sense un sistema de georeferenciació implicava incorporar elements de referència, en el cas de la Kinect, indicadors com: ubicació de la façana del cub i punt mitjà d'aquesta (Fig. 7). La principal limitació de la Kinect d'utilitzar-se en espais tancats o en espais oberts però amb una il·luminació controlada, feia que la captura de núvols de punts s'hagués de realitzar quan es començava a fer fosc. A mesura que es reduïa la llum ambiental, millorava la presa de dades de la Kinect, incrementant-se el nombre de punts mesurats.



**Fig. 8** Muntatge utilitzat per a la presa de dades. Vehicle autònom amb la Kinect, focus per al control de la il·luminació i ordinador per al processament de la captació de dades.



## 2.4 Tractament de dades

Les dades adquirides tant pel sensor Kinect com pel sistema Lidar són emmagatzemades en format ASCII. En el cas de la Kinect, donat que les dades no s'han georeferenciat, els arxius ASCII poden ser visualitzats directament com un núvol de punts mitjançant un programa de tractament de núvols de punts, com el CloudCompare. Els arxius ASCII generats per la Kinect inclouen per cada punt informació de la seva posició respecte el sensor (x,y,z), color (R,G,B), així com dades sobre la reflectivitat en l'infraroig IR.

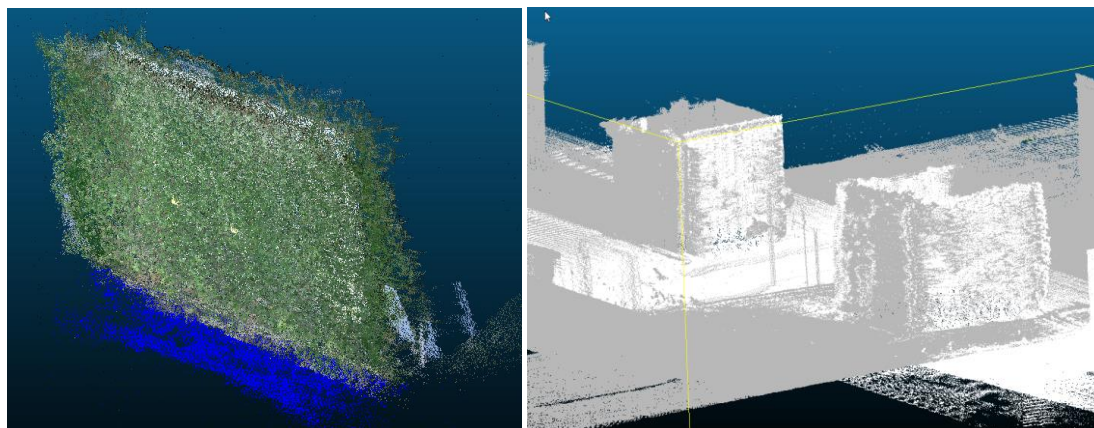
Pel que fa al sistema Lidar, s'utilitza un programa elaborat amb LabView per realitzar la captació de dades. Les mesures s'emmagatzemen en arxius ASCII que contenen informació de la distància respecte el lidar corresponent a cada emissió. El model lidar Hokuyo utilitzat, és capaç de proporcionar un màxim de tres distàncies o ecos per cada emissió. Dins aquest arxiu també apareixen periòdicament diferents línies de text amb les coordenades subministrades pel receptor RTK-GNSS. Aquests arxius de captura han de ser processats amb Matlab per tal d'obtenir un arxiu ASCII final on es disposarà de les coordenades absolutes per cada punt. Aquests arxius ja poden ser visualitzats amb el CloudCompare, amb la diferència respecte la Kinect, que no es disposa d'informació RGB.

## 2.5 Processament dels núvols de punts

En aquest apartat, s'explica el procediment seguit per a l'estudi dels núvols de punts 3D captats mitjançant el sensor Kinect v2. Al tractar-se d'un estudi inèdit, ha calgut anar prenent decisions a mesura que s'anava processant la informació, fet que ha suposat tot un repte a la cerca dels resultats més adients per a complir el propòsit de l'estudi, és a dir, la mesura del volum de vegetació de les façanes escanejades.

### 2.5.1 Presa de contacte amb arxius

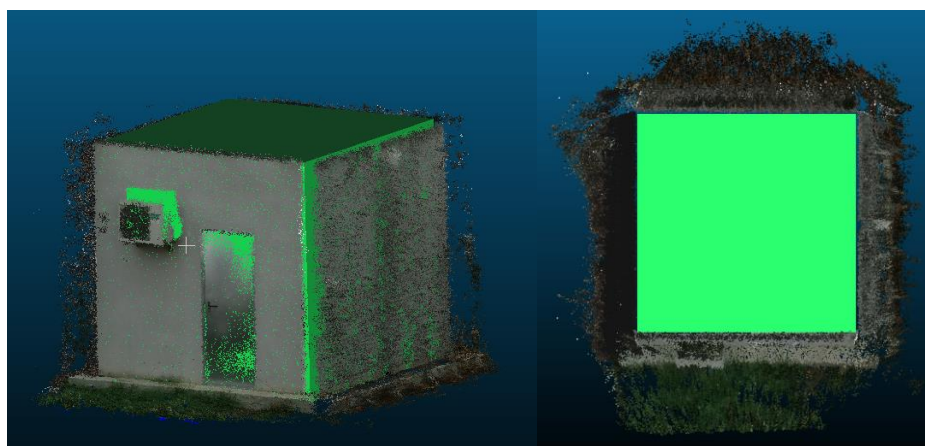
La primera dificultat es feia present tan bon punt s'executava l'arxiu dins el programa de processament. En el cas de la Kinect, no es comptava amb georeferenciació i per tant les façanes del cub no venien amb una orientació i posicionament adequat per iniciar les proves (Fig. 9). Per contra, el sistema Lidar, comptava amb posicionament UTM (Sistema de Coordenades Universal Transversal de Mercator), fet que després de certs processos de re-escalat automàtic del programa, posicionava els arxius d'igual manera en què s'havien pres. Aquesta diferenciació pren rellevància en punts posteriors i també en el primer de tots: l'orientació i reconstrucció de l'escenari per part de l'usuari.



**Fig. 9** Diferències de previsualització de totes les cares un cop obertes en el programa dels dos perifèrics. A l'esquerra, els arxius Kinect superposats un damunt de l'altre, a la dreta, els arxius lidar posicionats automàticament gràcies a la georeferenciació.

### 2.5.2 Construcció del cub

Mitjançant diferents eines de transformació: matricials, axials o de reorientació manual, essent aquesta última la més utilitzada, es podia arribar a generar amb certa precisió el cub format per totes les façanes que prèviament estaven superposades (Fig. 10).



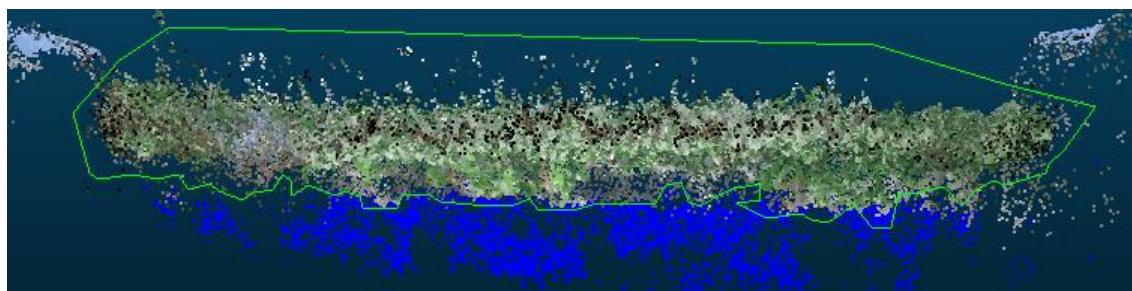
**Fig. 10** Reorientació de les cares per a crear el cub a partir del vist en la fig.9

Un cop identificades les cares es va prosseguir aïllant i estudiant cadascuna d'aquestes en arxius independents. Aquest punt era indispensable en el Lidar, ja que els arxius generats comptaven amb un pes molt elevat fet que impedia una interacció adequada amb el programa. La presa de dades que realitzava la Kinect era avantatjosa pel que fa a la manipulació d'arxius.

### 2.5.3 Neteja dels murs

El següent punt consistia en fer neteja de cada cara de la façana de l'anomenat "soroll" de partícules o punts residuals, on la Kinect presentava el gran avantatge d'incorporar color. Aquest terme feia referència a punts captats pels emissors làser o infraroigs de partícules en suspensió de diferent índole amb capacitat per donar senyal als perifèrics.

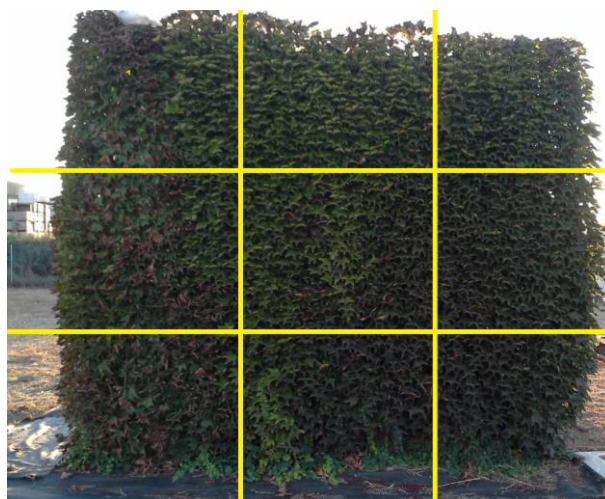
El soroll podia arribar a representar un problema si no es feia una neteja acurada, ja que podia alterar diferents mesures com distàncies, densitats de punts, etcètera i per tant, falsejar resultats en major o menor mesura. Per aquest propòsit s'oferia, que hom conegués, dues eines. La primera d'elles anomenada "SOR" (filtre atípic estadístic), que computava la distància mitjana de cada punt respecte dels veïns i eliminava els que no estaven compresos dins d'uns paràmetres assignats per l'usuari. En segon lloc, es disposava de l'eina "segment" (Fig. 11), similar a l'eina retallar, però amb la diferència de què podia crear polilínies i ajusta en major mesura l'element a eliminar.



**Fig. 11** Eina segment. Exemple on es mostra la polilínia (en verd) que realitza el retall dels punts que no presenten valor per a l'estudi.

En aquest apartat es van realitzar diferents procediments i acabats de façana fins a arribar al considerat adequat per a prosseguir l'estudi. En un d'ells, la neteja consistia a eliminar els punts residuals així com la base d'arrels, tronc i fulla morta existent en el núvol per arribar a aïllar el fullatge. El problema d'aquesta primera aproximació residia en què tot i comptar amb la dada de color, existent únicament en Kinect, la vegetació en els extrems s'unia, fet que provocava l'aparició de punts no corresponents a aquella façana i impossibles d'eliminar.

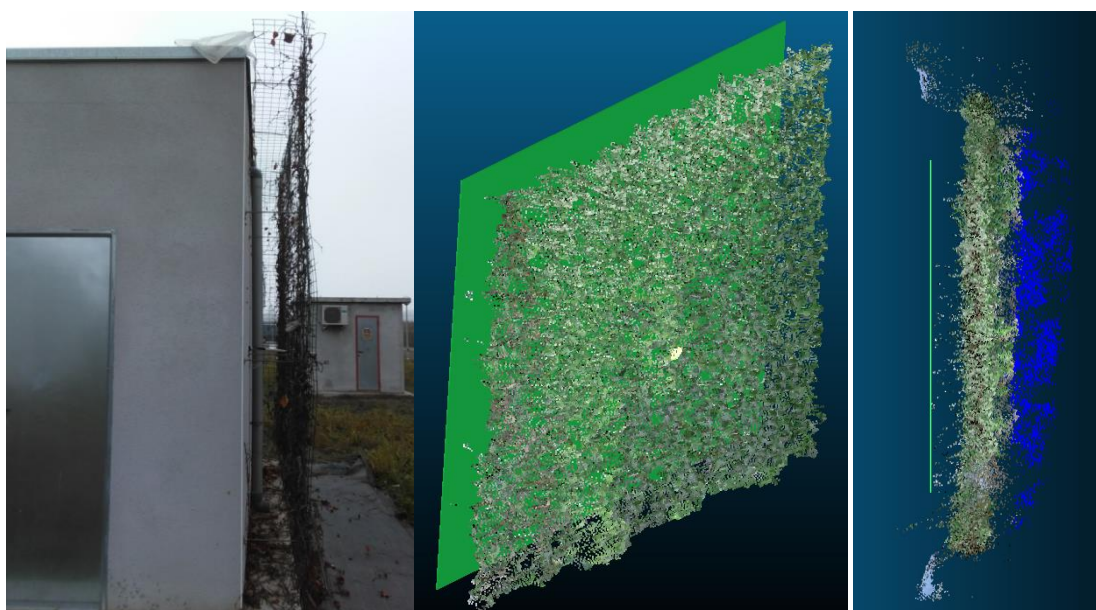
La solució final consensuada per l'equip de treball, després de revisar articles previs amb els quals s'havien d'establir relacions (12), va consistir en eliminar els punts residuals i retallar tota aquella massa vegetada que sobresurtís de la façana de tres per tres metres. Amb aquests passos, el que s'evitava era l'aparició de punts distants sense sentit i l'eliminació d'aquells que es presentaven de forma duplicada en diferents façanes, en estar situades aquestes perpendicularment unes respecte de les altres. Altrament, és cert que aquesta mesura dràstica també venia condicionada pel fet de que el càlcul de LAI i temperatura s'havia efectuat en una matriu 3x3 on cada quadrant responia a unes dimensions d'un metre per un metre (Fig. 12).



**Fig. 12** Representació aproximada dels quadrants de la matriu utilitzats tant en estudis previs com en l'actual.

#### 2.5.4 Càlcul de distàncies dels punts respecte a la façana

Orientada i netejada la façana, es va prosseguir amb l'aplicació d'eines per tal d'incorporar més dades als punts captats. El repte consistia en conèixer la distància dels punts respecte a la paret del cub. Aquesta era una dada imprescindible per a calcular posteriorment el volum de la vegetació. Investigant les possibilitats que oferiria el programa, va sorgir la idea de relacionar dues eines per tal d'assolir el que es proposa. Una d'elles era la funció "Primitive Factory", eina que permetia generar figures geomètriques o plans, la qual es va fer servir per recrear de manera virtual un pla 3x3 simulant la paret del cub (Fig. 13). L'espai de 20 cm existent entre la paret i l'enreixat de subjecció de la planta s'aconsegueix posicionar per mitjà dels punts de referència representats en la (Fig. 13), en color gris.



**Fig. 13** D'esquerra a dreta. Instal·lació real del sistema de subjecció de la planta, representació virtual de la façana i elements de referència (en gris) utilitzats en la Kinect per a posicionar la façana virtual a la distància corresponent.



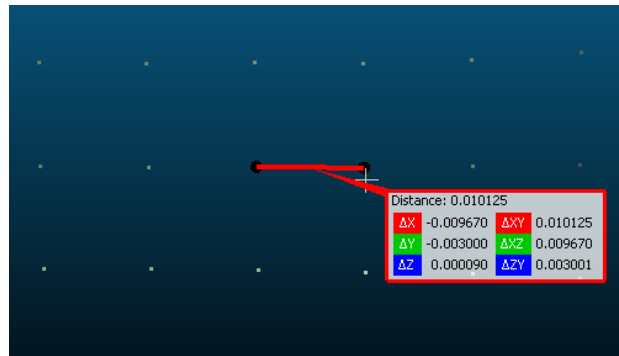
Realitzat el pas previ, és quan es va incorporar l'algoritme "cloud to mesh". Aquesta eina, agafant com a referència l'element geomètric creat que respon a una malla triangular, realitzava un càlcul de les distàncies que hi havia entre els dos elements. Al realitzar el còmput anterior, el programa creava un nou camp escalar, anomenat "C2M", on incorporava la nova dada de distància als punts. Tindre en compte el fet que si el mur virtual presenta gruix, en cas de crear un cub com a representació d'un pla, s'afegirà el valor del gruix al total de distància entre els dos elements a analitzar. Per mitjà de l'histograma que apareix en l'arbre lateral es podia arribar a comprovar que no hi hagués cap punt fora del rang (0, x) on x dependria del punt màxim de la vegetació a condició que fos raonable.

Diversos van ser els procediments valorats en aquest punt, un d'ells, plantejava el dubte d'eliminar o no aquella massa existent entre la malla de subjecció i la paret. En un principi, es creia que aquests punts responien a informació no rellevant o residual i amb cap relació amb la vegetació, ja que la idea generalitzada era que els perifèrics no podien arribar a captar la massa ubicada en la zona posterior. Finalment, l'equip va decidir mantenir tots els punts existents en aquest espai, ja que podien ser de gran interès a l'utilitzar-se per calcular d'una forma aproximada la vegetació generada per darrere de la malla de subjecció. En l'apartat d'Excel, (Secció 2.5.6 Generació de l'Excel), s'aprofundeix en com es va utilitzar aquesta massa de punts per tal de calcular un volum més acurat en cadascuna de les façanes. Els càlculs plantejats eren aplicables en els dos perifèrics.

#### 2.5.5 Rasteritzat de les façanes

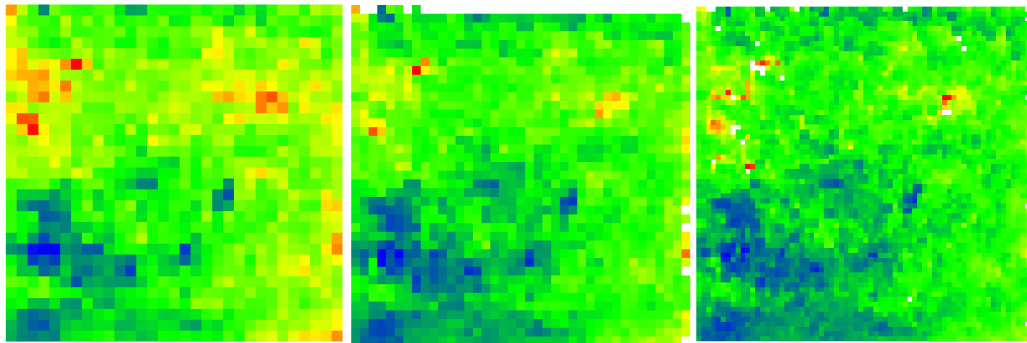
Com indica l'apartat, l'eina aplicada al núvol de punts processats "rasteritza" i exporta un nou núvol. El núvol que es genera, respon a múltiples paràmetres elegits per l'usuari però resumidament el que es crea són nous punts que agrupen punts de l'anterior núvol i aporten un seguit de dades per a una anàlisi posterior.

L'eina "Convert a cloud to 2D raster" és capaç d'introduir un seguit de dades de gran interès per al conjunt del treball. El primer paràmetre exigint respon a les dimensions de la cel·la que conformarà el nou punt on la restricció està estretament lligada amb la limitació del perifèric amb el qual es treballa. A causa de la comparativa que busca el treball, la dimensió de la cel·la l'acota aquell perifèric que compta amb una limitació de resolució major i per tant de captació de dades inferior. En aquest cas, la comprovació per determinar quin dels dos limitava, era ampliar el núvol fins a veure els punts de manera clara i utilitzar l'eina "Point Picking", per determinar la distància existent entre punts de tal manera que la dimensió de cel·la hagués de recollir un mínim de 2 punts. La Fig. 14 mostra gràficament el procés de "Point Picking". Finalment la limitació es va establir a causa que el sistema Lidar en rasteritzats amb dimensions de cel·la inferiors a 0.045x0.045m creava cel·les buides degudes a una velocitat de captació massa elevada. Per tant, es va establir un mínim de 0.045x0.045m en el dimensionat de cel·les per a l'estudi de les façanes.



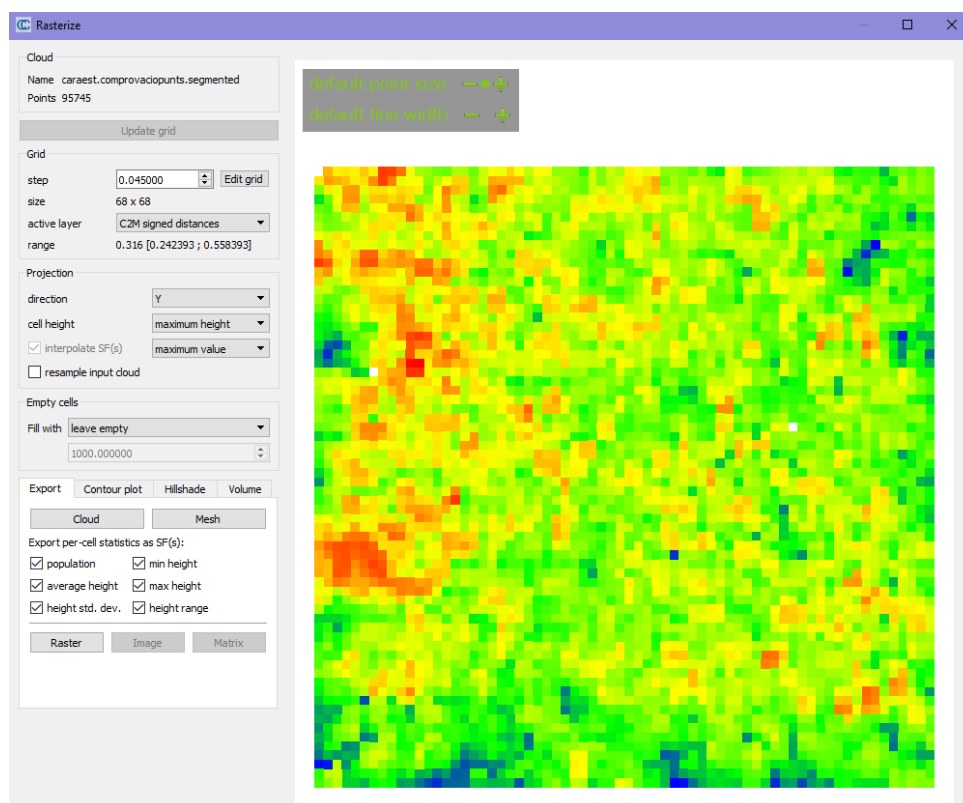
**Fig. 14** Eina Point Picking per a determinar la dimensió de les malles del rasteritzat.

En aquest punt es va observar que a menor dimensió de cel·la, major precisió en la recollida de punts i acurat en el volum (Fig. 15).



**Fig. 15** D'esquerra a dreta: dimensions de cel·la de 0.1x0.1m, 0.08x0.08m i 0.045x0.045m. S'aprecia l'aparició de zones on no hi ha vegetació a mesura que es redueix la dimensió de la cel·la.

Els paràmetres restants compleixen funcions com la selecció de la capa a analitzar, la perspectiva des de quina fer-ho (la qual depèn de l'orientació del núvol), l'alçada de cel·les a analitzar (dividida en 3 categories), la introducció o no de cel·les buides en el nou núvol i un seguit de dades com població, alçada mitjana, màxima, mínima, desviació estàndard i rang. En el cas que ocupa el treball, la capa activa de processat era la generada en el càlcul de distàncies anteriors (C2M), la direcció d'anàlisi corresponent a aquella que projectava el núvol frontalment, l'alçada de cel·les màxima, la discriminació de les cel·les sense dades i la selecció de tots els paràmetres resumits anteriorment. Seleccionats els paràmetres es creava un nou núvol similar al que es veu en la Fig. 16.



**Fig. 16** Finestra de l'eina raster on representa el nou núvol i es seleccionen els paràmetres que l'usuari vol que recullin els nous punts.

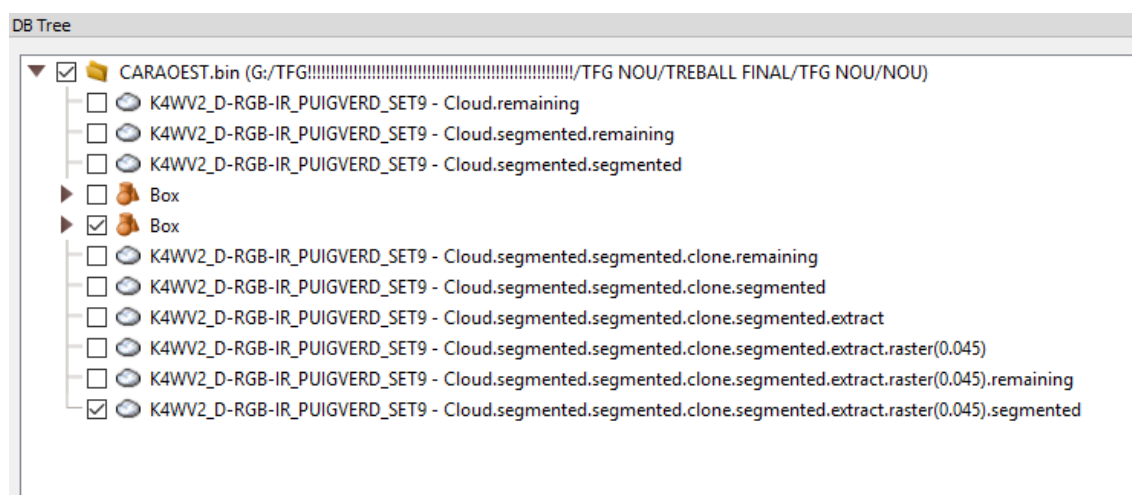
L'alçada de cel·les màxima responia a la necessitat d'analitzar els punts més allunyats de cada cel·la, buscant parametritzar el volum màxim. La representació de cel·les buides, no era necessària en el processat posterior de les dades i per això es va excloure. En l'apartat corresponent als paràmetres que l'usuari podia incorporar als punts de la nova cel·la, es van seleccionar tots, ja que en cas de no ser necessaris l'eliminació d'aquests era ràpida.

Es van descartar alguns procediments de processat inicialment implementats a causa del volum de feina extra que comportaven i la baixa aportació al propòsit del treball. En un d'aquests, es generaven diferents rasteritzats de la cel·la on es modificava l'alçada de les cel·les a analitzar. Es creaven 3 malles corresponents als tres nivells d'alçada: mínim, mitjà i màxim. Cadascun d'aquests arxius, processats posteriorment en Excel, s'unien en un únic arxiu per tal de realitzar un càlcul de volum. El problema, era que volum generat menyspreava la massa vegetada existent entre la façana i l'enreixat de subjecció de la planta.

Destacar que la previsualització que s'aporta en la (Fig. 16) no coincideix en orientació amb l'arxiu d'origen. L'usuari ha de tindre compte aquest aspecte i no modificar el posicionament de l'objecte que analitza per tal que en previsualitzar aquest quedi orientat com hauria.

### 2.5.6 Generació de l'Excel

Dins del programa de processament, la generació d'arxius en Excel responia a l'últim pas previ a l'anàlisi numèric en aquest. Generades les noves malles amb l'eina anterior, la conversió del que fins ara eren imatges a valors numèrics no requeria una metodologia complexa com fins ara. El programa CloudCompare presenta un arbre (Fig. 17) on recopila tots els arxius creats per l'usuari a mesura que s'apliquen diferents eines. La malla creada a partir del núvol de punts original per mitjà de l'eina Raster 2D, s'ubica en un arxiu aïllat. El procés de conversió tractava de guardar l'arxiu en extensió (.txt) compatible amb el programa Excel.



**Fig. 17** Arbre a mode d'exemple on apareixen els arxius que es van creant a mesura que s'aplica la metodologia. L'extensió seguida del guió, respon als processos aplicats.

## 2.6 Càlcul del volum i classificació de punts

Per al càlcul del volum corresponent de cada cel·la, procedent del rasteritzat de cada cara de les façanes estudiades, es va utilitzar el programa Excel on, a més a més, es va procedir al classificat d'aquestes en els quadrants corresponents segons la posició que tenien en la façana.

Abans de treballar amb les dades procedents del rasteritzat, la primera tasca a realitzar era identificar a quins valors pertanyen les dades de l'arxiu .txt extret. En aquest arxiu, sortien representades en columnes totes les dades de les cel·les que prèviament en l'apartat de paràmetres s'havia demanat incorporar. D'esquerra a dreta les columnes en Excel pertanyien a :

- A. Coordenada X
- B. Coordenada Y
- C. Coordenada Z
- D. color R
- E. color G



- F. color B
- G. Distàncies respecte origen de coordenades
- H. Densitat de població de les cel·les
- I. Alçada mínima
- J. Alçada màxima
- K. Alçada mitjana
- L. Desviació estàndard
- M. Rang d'alçades
- N. Distància de la cel·la respecte la paret

D'aquestes dades, les més interessants per aquest treball eren les coordenades, que s'utilitzaven per situar els punts en els respectius quadrants i la distància de la cel·la respecte a la paret que s'utilitzava per calcular el volum de vegetació.

### 2.6.1 Càlcul del volum

Cada cel·la agrupava els punts que hi havia compresos en una àrea de 20,25 cm<sup>2</sup>, superfície que responia a les dimensions de la cel·la descrites anteriorment. Sabent això i la distància de la cel·la respecte a la paret, s'estimava el volum de vegetació que hi havia comprès en aquest prisma. Per al càlcul del volum total de cada cara, es feia una suma dels volums calculats de les cel·les. No obstant, no es tracta d'un càlcul directe, ja que seria un error considerar que la vegetació arriba de manera uniforme fins a la paret donat que aquesta creix en un enreixat modular situat a 20 cm d'aquesta (Fig. 18). Com ja s'ha argumentat en apartats anteriors, no s'havia de cometre l'error de restar el volum existent entre la paret i l'enreixat, ja que la vegetació tot i créixer cap a fora, també ho feia en menor mesura cap a dins. Per recrear de manera fidedigna el creixement que experimentava la vegetació es va considerar que aquesta ho feia de manera proporcional. Prenent com a hipòtesis que a major volum creixent en direcció contrària a la paret major seria el volum existent en l'espai situat entre aquesta i l'enreixat, es va extreure una fórmula per realitzar el càlcul. D'aquesta forma a la cel·la amb els punts més allunyats de la paret també li corresponien els punts més propers a aquesta. La distància mínima a la paret s'havia estimat en 10 cm. A partir d'aquest anàlisi previ, es va fer la proposta d'una fórmula per tal de realitzar un càlcul del volum real de cada cel·la:

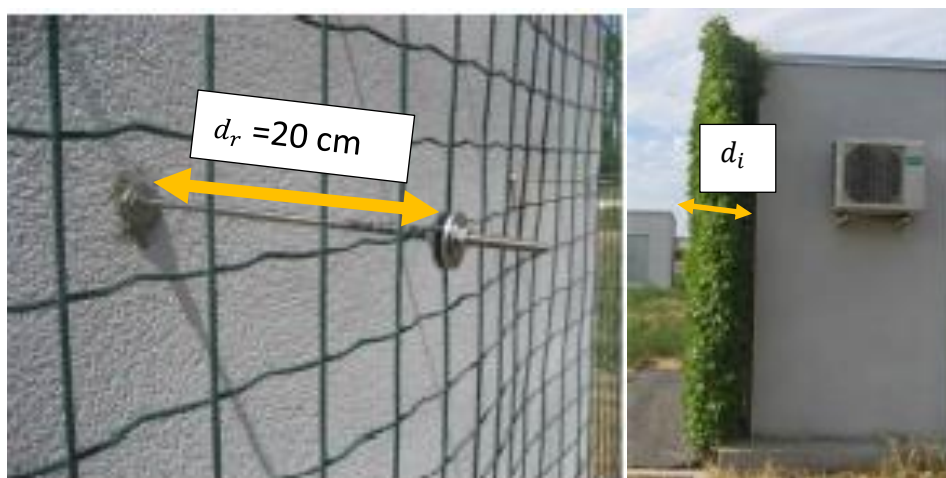
$$V_i = d_i' \cdot a^2 \quad (1)$$

on:  $V_i$ : volum de vegetació d'una cel·la [m<sup>3</sup>]  
 $d_i'$ : distància de qualsevol punt i a la paret corregida[m]  
 $a$ : 0,045m de longitud del costat de la cel·la

### Càlcul de la distància corregida

La correcció va consistir en afegir un 20% a la distància existent entre enreixat i vegetació. Es va fixar aquest criteri després de considerar que al punt de vegetació més

allunyat de l'enreixat (46 cm) li corresponien 10 cm de penetració de la vegetació a l'enreixat.



**Fig. 18** Representació de les distàncies considerades en els càlculs.

Es pot veure el procediment seguit a les equacions següents.

$d_i$ : distància de qualsevol punt a la paret[m]

$d_{max}$ : distància màxima d'un punt  $d_i$  a la paret[m]

$d_r$ : distància de la reixa a la paret[m]

$d_p$ : distància de penetració de la vegetació de la reixa a la paret[m]

$$d_i' = (d_i - d_r) + \frac{d_p \cdot (d_i - d_r)}{(d_{max} - d_r)} \quad (2)$$

$$d_i' = (d_i - 0.2) + \frac{0.1 \cdot (d_i - 0.2)}{(d_{max} - 0.2)} \quad (3)$$

Per al cas de  $d_{max} = 0,66 \text{ m} \Rightarrow$

$$\begin{aligned} d_i' &= (d_i - 0.2) + \frac{0.1 \cdot (d_i - 0.2)}{(d_{max} - 0.2)} = (d_i - 0.2) + \frac{0.1 \cdot (d_i - 0.2)}{(0.66 - 0.2)} \\ &= (d_i - 0.2) + \frac{0.1 \cdot (d_i - 0.2)}{0.46} = \\ &= (d_i - 0.2) + \frac{0.1}{0.46} \cdot (d_i - 0.2) \cong (d_i - 0.2) + 0.20 \cdot (d_i - 0.2) = 1.2 \cdot (d_i - 0.2) \quad (4) \end{aligned}$$

La fórmula utilitzada finalment per al càlcul del volum de les cel·les s'expressa com:

$$V_i = (d_i - 0.2) \cdot 1.2 \cdot 0.045^2 \quad (5)$$

### Correcció de volums negatius

En alguna cara, es van observar casos en què el resultat de la fórmula per al càlcul del volum anterior donava un valor negatiu. Es va localitzar l'error en aquells casos on la distància  $d_i$  era menor als 0.2 m, per tant, punts que no sobrepassaven l'enreixat modular. En tractar-se d'un percentatge molt reduït, es va acordar que en aquests casos el volum es consideraria nul. Així, tot i una variació mínima en el resultat, s'obté un volum més ajustat amb un error inferior. La correcció es du a terme implementant la següent ordre lògica:

$$d_i' = (d_i - 0.2) + \frac{0.1 \cdot (d_i - 0.2)}{(d_{max} - 0.2)} < 0 \Rightarrow d_i' = 0 \quad (6)$$

#### 2.6.2 Classificació de les cel·les per columnes, files i quadrants

El classificat de les cel·les segons el quadrant al qual corresponen va ser una mesura adoptada de gran interès per tal d'analitzar amb detall quines zones de la façana vegetada havien experimentat un desenvolupament adequat i quines requerien una major cura. L'estudi previ del càlcul del LAI (2015) es va realitzar en divisions de 9 quadrants d'1 m<sup>2</sup>, tal com s'ha fet en aquest treball, per així observar si es podia establir algun tipus de relació entre els metres cúbics de vegetació amb la dada LAI.

La classificació de les cel·les es du a terme de 3 formes diferents: per files, columnes i quadrants. En la Taula 4 s'aprecia de quina manera s'ha fet la divisió de les cares del cub de dimensions 3x3 m.

L'agrupació de les cel·les per files, columnes i quadrants, es va fer possible gràcies a les dades de coordenades (X,Y,Z) corresponents a cadascuna d'aquestes. Primerament es va fer un classificat en files i columnes per mitjà de productes lògics. Coneguts aquests dos punts, es va procedir a realitzar la classificació per quadrants d'igual forma incorporant els dos paràmetres obtinguts, prèviament classificats en columnes.

Passos per a la classificació de les cel·les en files, columnes i quadrants:

1. Es va realitzar el càlcul de la diferència existent entre la coordenada màxima i mínima (coord. Z en el cas de files, coord. X en el cas de columnes). D'aquesta manera, a part d'obtenir la mesura de l'ample o alçada de façana també permetia saber si la neteja de punts s'havia realitzat correctament, ja que aquests valors no havien de ser superiors a 3 m.
2. A partir de la coordenada mínima, es varen crear 3 franges de dimensions equivalents d'1 metre en els casos que va ser possible i en els que no, es va respectar el dimensionat d'un metre en la franja central. D'aquesta manera, s'obtenien les franges amb les limitacions per coordenades per tal de classificar-hi les cel·les.

3. Seguidament, es va aplicar una funció lògica que assignava un valor numèric igual al de la [Taula 4](#), depenent de la fila/columna a la qual pertanyen.
4. Es va aplicar el mateix procediment que al punt 3 assignant un valor comprès entre l'1 i el 9 per tal de classificar les dades en quadrants.

Classificades les cel·les, es va poder obtenir el volum existent per files, columnes i quadrants per tal d'analitzar les zones d'interès i passar a fer el tractament estadístic.

**Taula 4** Formes en les que es distribuïran les cel·les obtingudes.

Columnes de 1m d'amplada

Columnes		
1a columna	2a columna	3a columna

Files de 1m d'altura

Files
3a fila
2a fila
1a fila

Quadrants de 1m d'amplada per 1m d'altura.

Quadrants		
7é	8é	9é
4t	5é	6é
1er	2n	3er

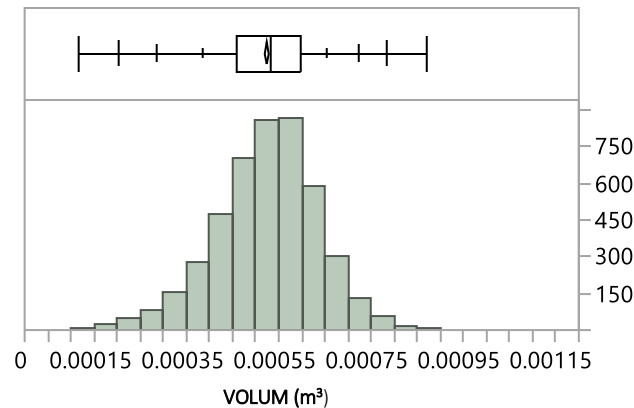
### 3 RESULTATS I DISCUSSIÓ

#### 3.1 Caracterització del volum de vegetació de les façanes

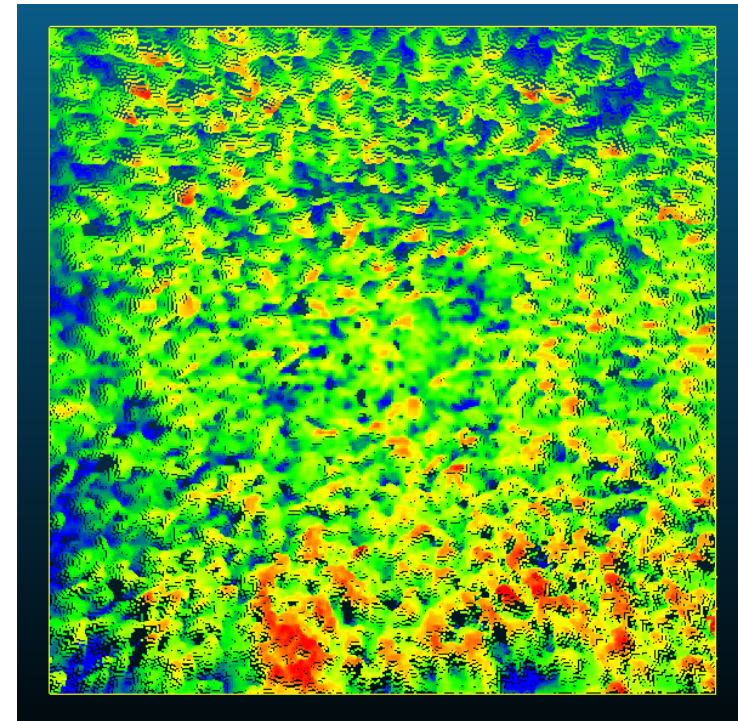
##### 3.1.1 Cara Est

**Taula 5** Volum de vegetació per files, columnes i quadrants de la cara est en m<sup>3</sup>.

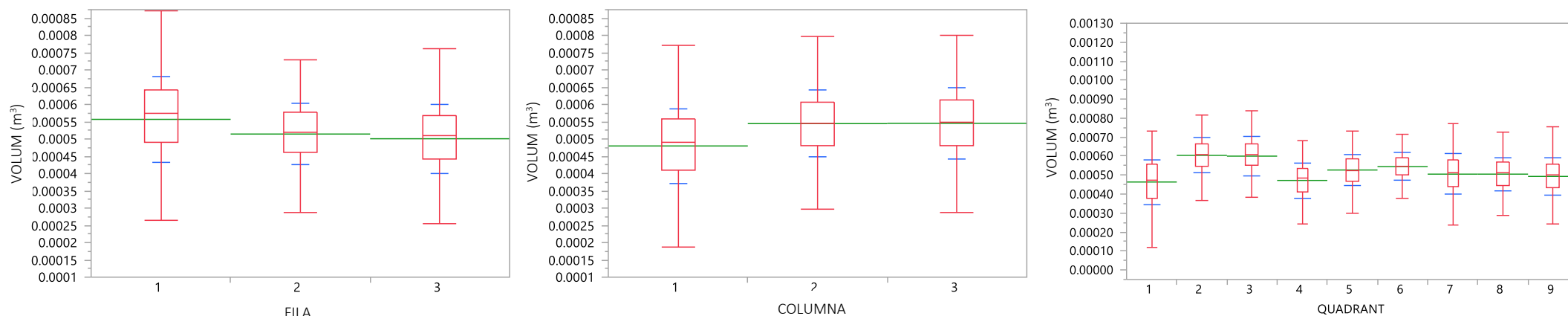
		COLUMNES			Vol. Total Files
		1a	2a	3a	
FILES	3a	0.244	0.256	0.239	0.739
	2a	0.239	0.279	0.276	0.793
	1a	0.218	0.306	0.290	0.814
	Vol. Total Col.	0.701	0.840	0.804	<b>2.345</b>



**Fig. 20** Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació de la cara est per cel·les.



**Fig. 19** Representació de la distància dels punts respecte al mur de la cara est. Essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans.



**Fig. 21** Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) del volum de vegetació per cel·la [ $m^3$ ] de les diferents files, columnes i quadrants de la cara est.

**Taula 6** Taula de connexions on es comparen les mitjanes de volum de vegetació de la façana est per files, columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació  $\alpha=0,05$ , segons la prova de Tukey-Kramer HSD.

Files	
Nivell	Mitjana
1	0.00055725a
2	0.00051466b
3	0.00050105c

Columnes	
Nivell	Mitjana
3	0.00054584a
2	0.00054491a
1	0.00048014b

Quadrants	
Nivell	Mitjana
2	0.00060384a
3	0.00059988a
6	0.00054480b
5	0.00052676b
7	0.00050500c
8	0.00050497c
9	0.00049300c
4	0.00047186d
1	0.00046350d

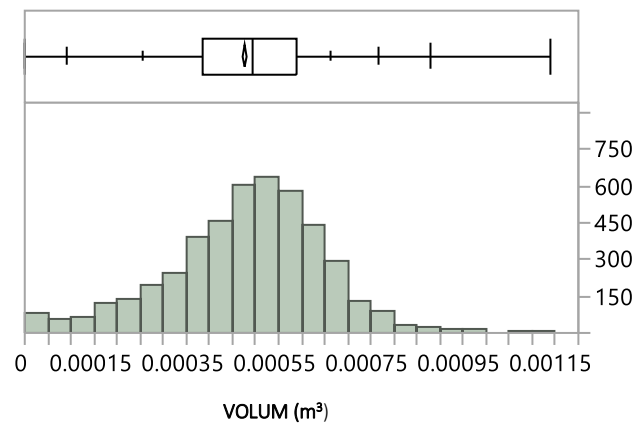
En la [Taula 5](#) i [Fig. 19](#) s'observa un volum significativament menor en la columna 1 respecte a les altres dues. La progressió que se suposa que ha d'experimentar la planta es compleix, ja que el volum de les files decreix a mesura que ens allunyem de la base de la planta. Això s'aprecia en la [Fig. 21](#) en fila i columna.



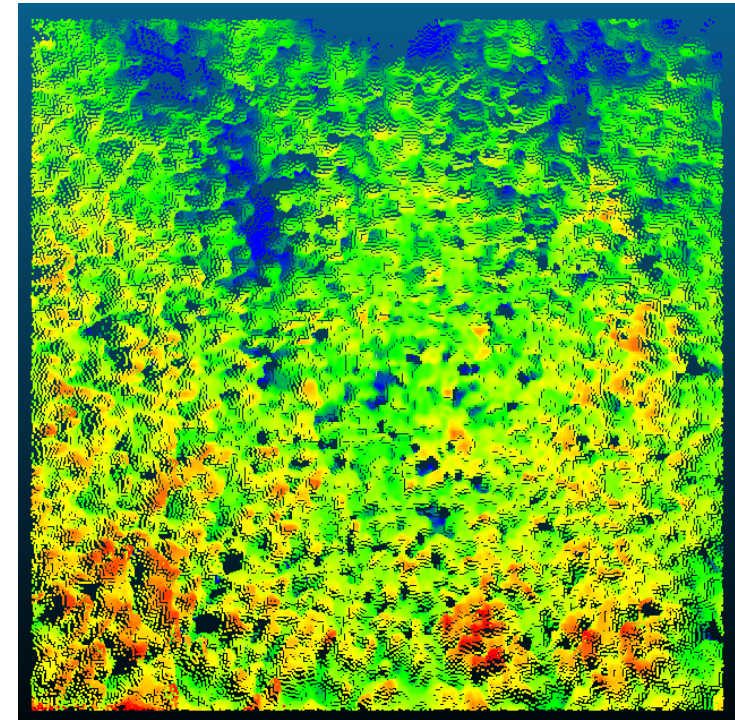
### 3.1.2 Cara Oest

**Taula 7** Volum de vegetació per files, columnes i quadrants de la cara oest en m<sup>3</sup>.

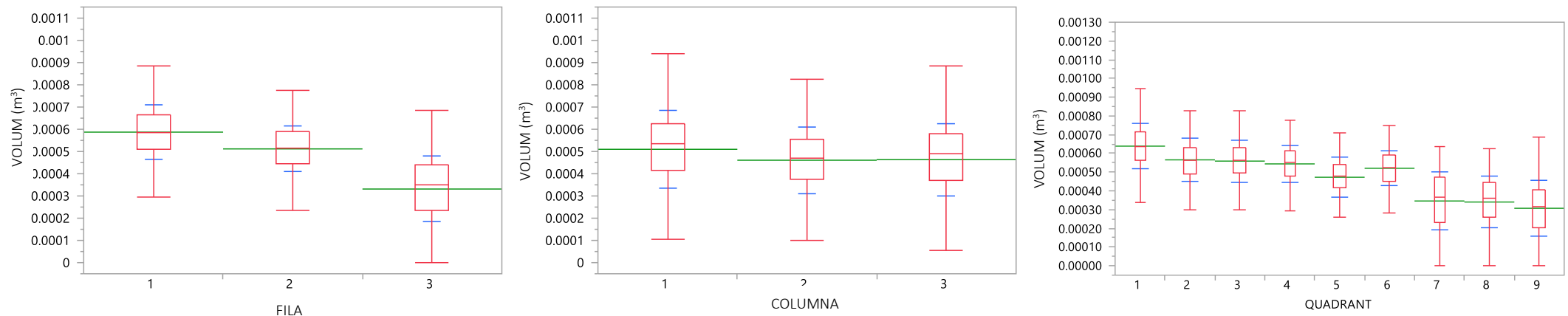
		COLUMNES			Vol. Total Files
		1a	2a	3a	
FILES	3a	0.167	0.167	0.147	0.482
	2a	0.275	0.250	0.263	0.788
	1a	0.308	0.286	0.270	0.864
	Vol. Total Col.	0.750	0.703	0.681	<b>2.134</b>



**Fig. 23** Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació de la cara oest per cel·les.



**Fig. 22** Representació de la distància dels punts respecte al mur de la cara oest. Essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans.



**Fig. 24** Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) del volum de vegetació per cel·la [m³] de les diferents files, columnes i quadrants de la cara oest.

**Taula 8** Taula de connexions on es comparen les mitjanes de volum de vegetació de la façana oest per files, columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències, mentre que lletres coincidents indiquen una semblança amb un nivell de significació  $\alpha=0,05$ , segons la prova de Tukey-Kramer HSD.

Files	
Nivell	Mitjana
1	0.00058717a
2	0.00051167b
3	0.00033116c

Columnes	
Nivell	Mitjana
1	0.00050988a
3	0.00046335b
2	0.00046077b

Quadrants	
Nivell	Mitjana
1	0.00063858a
2	0.00056535b
3	0.00055877b
4	0.00054385bc
6	0.00052041c
5	0.00047253d
7	0.00034587e
8	0.00034033e
9	0.00030697f

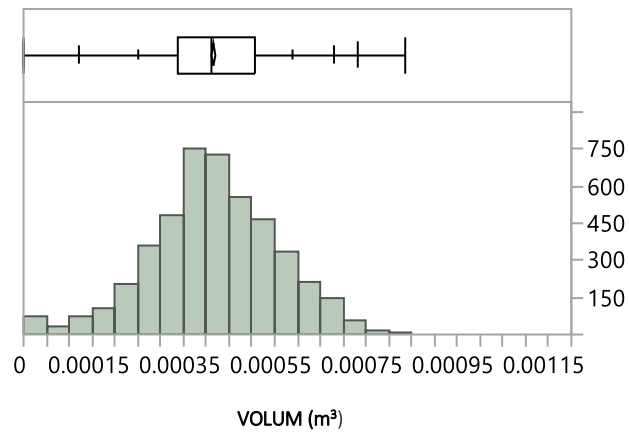
En la [Taula 7](#) i [Fig. 22](#) s'aprecia tant numèricament com visualment una despoblació en la part superior de la façana. En la [Fig. 24](#) s'observa la diferència existent en comparació amb les files inferiors. La progressió natural de la parra verge, tot i experimentar un decreixement a mesura que repta per la façana, denota un problema de desenvolupament en la zona alta que es fa més notable en els quadrants 8 i 9, [Fig. 24](#), on hi ha espais sense vegetació.



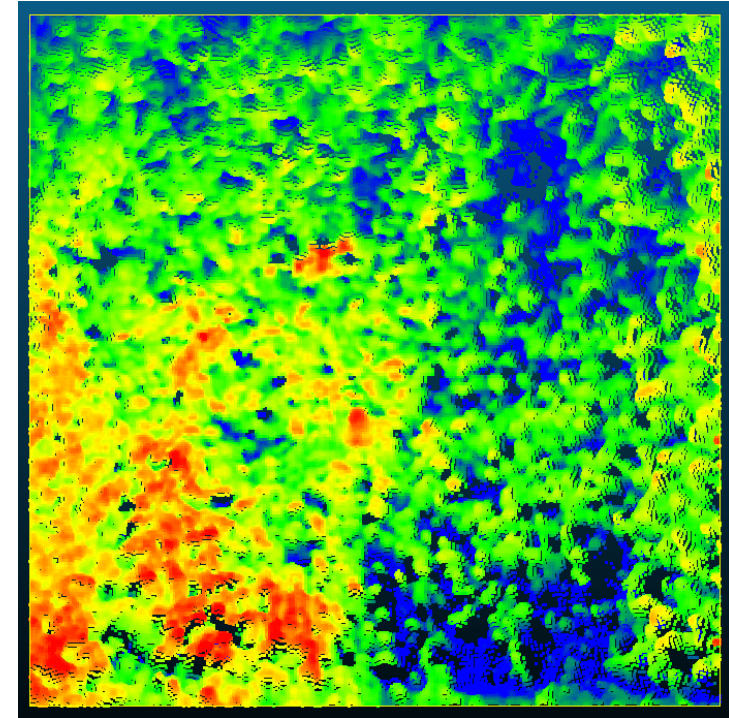
### 3.1.3 Cara Sud

**Taula 9** Volum per files, columnes i quadrants de la cara sud en m<sup>3</sup>.

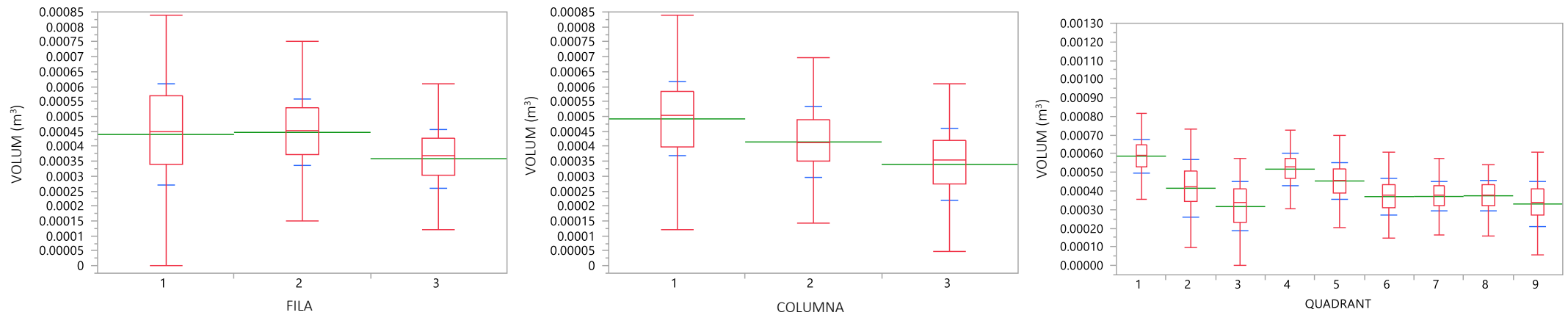
		COLUMNES			Vol. Total Files
		1a	2a	3a	
FILES	3a	0.179	0.189	0.158	0.527
	2a	0.261	0.240	0.187	0.688
	1a	0.284	0.207	0.150	0.641
	Vol. Total Col.	0.724	0.636	0.496	<b>1.856</b>



**Fig. 26** Histograma i diagrama de caixa del volum de vegetació de la cara oest per cel·les.



**Fig. 25** Representació de la distància dels punts respecte al mur de la cara sud. Essent els blaus els més propers i els rojos els més llunyans.



**Fig. 27** Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes) i desviació estàndard (línies blaves) del volum de vegetació per cel·la [m³] de les diferents files, columnes i quadrants de la cara sud.

**Taula 10** Taula de connexions on es comparen les mitjanes de volum de vegetació de la façana es per files, columnes i quadrants. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació  $\alpha=0,05$ , segons la prova de Tukey-Kramer HSD.

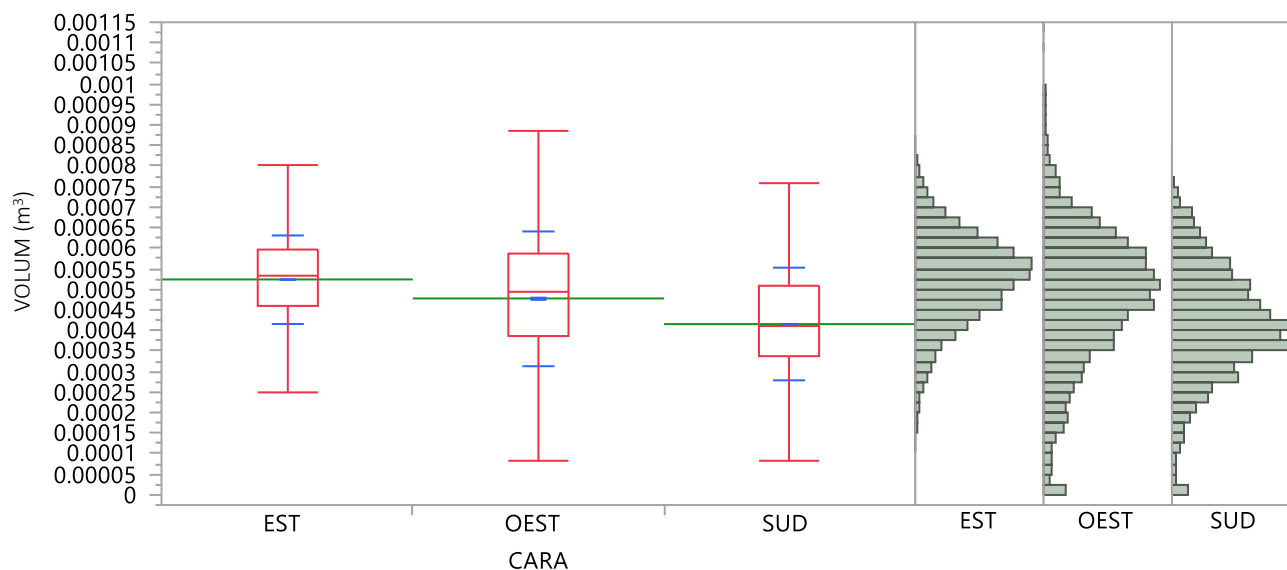
Files	
Nivell	Mitjana
2	0.00044672a
1	0.00043964a
3	0.00035844b

Columnes	
Nivell	Mitjana
1	0.00049176a
2	0.00041455b
3	0.00033921c

Quadrants	
Nivell	Mitjana
1	0.00058682a
4	0.00051698b
5	0.00045340c
2	0.00041447d
8	0.00037403e
7	0.00037038e
6	0.00036963e
9	0.00032995f
3	0.00031615f

La cara sud es presenta com la més desfavorable pel que fa a massa vegetada. En la [Taula 9](#) i [Fig. 25](#) s'observa que la cara presenta una forta despoblació en la columna 3 i part de la 2 i una acumulació en l'extrem esquerre inferior. La comparativa numèrica d'aquest fet, s'observa en la [Fig. 27](#).

### 3.2 Comparació entre cares dels volums calculats



**Fig. 28** Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes), desviació estàndard (línies blaves) i histogrames on es representa el volum per cel·la de les diferents façanes vegetades.

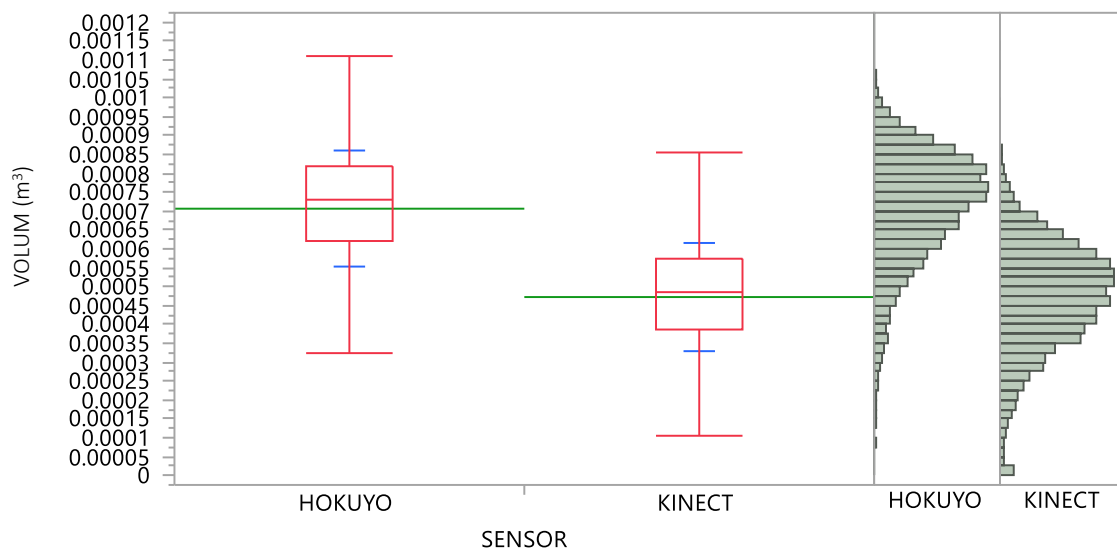
**Taula 11** Taula de connexions on es representa si hi ha alguna semblança volumètrica respecte un altra. Lletres diferents en les mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació  $\alpha=0.05$ , segons la prova Tukey-Kramer HSD.

Nivell	Mitjana
EST	0.00052407a
OEST	0.00047779b
SUD	0.00041537c

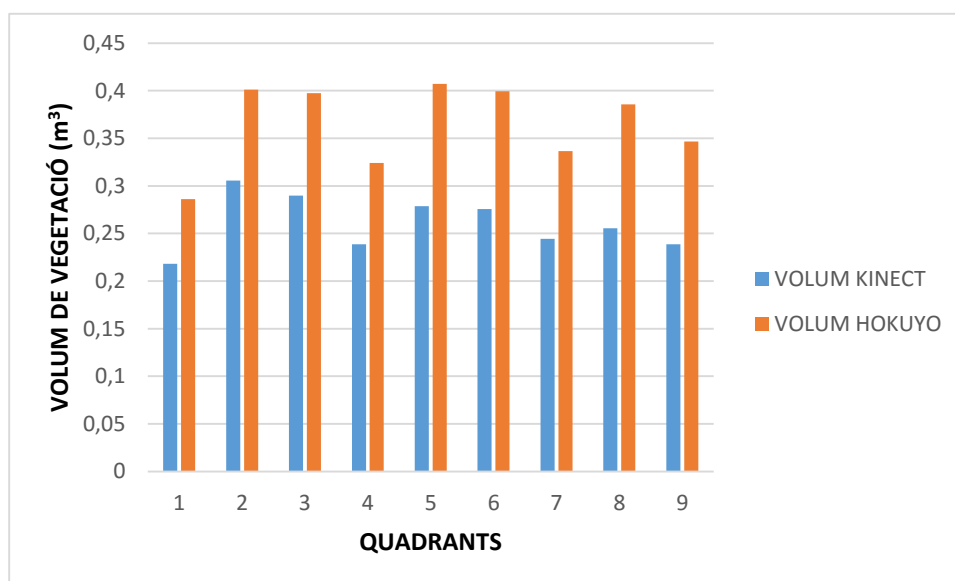
Les suposicions prèvies al càlcul dels volums de cada cara s'han complert. La cara est, la més desenvolupada en els moments de les mesures, tant del LAI com de la presa de dades amb els escàners, ha esdevingut en processar les dades com aquella amb un volum més elevat. La concentració de punts en la cara est en referència als volums de cada cel·la Fig. 28 respon a aquesta premissa.

Per contra, una major dispersió d'aquests, es tradueix en un volum menys elevat en el cas de les cares oest i sud.

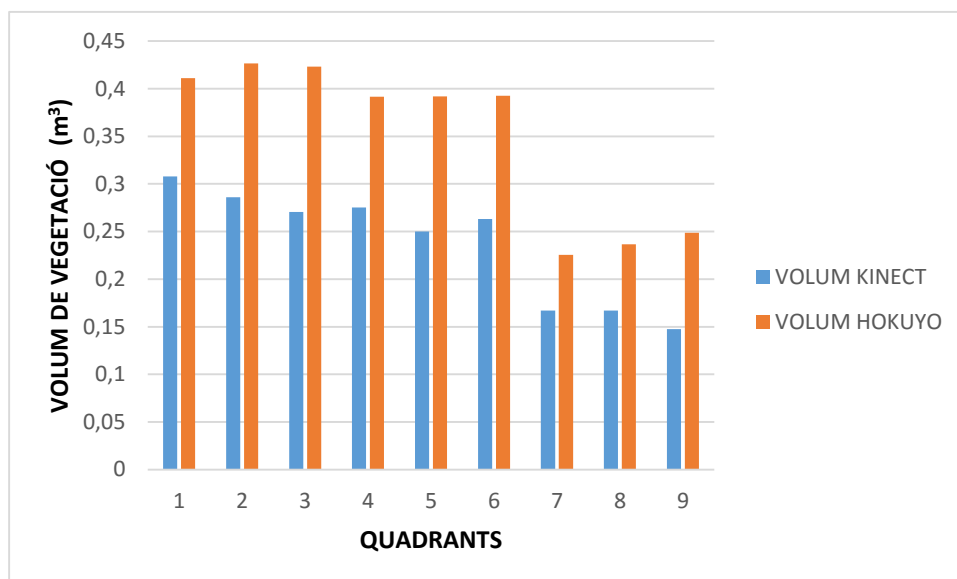
### 3.3 Comparació entre sensors i relació de volums calculats per quadrants



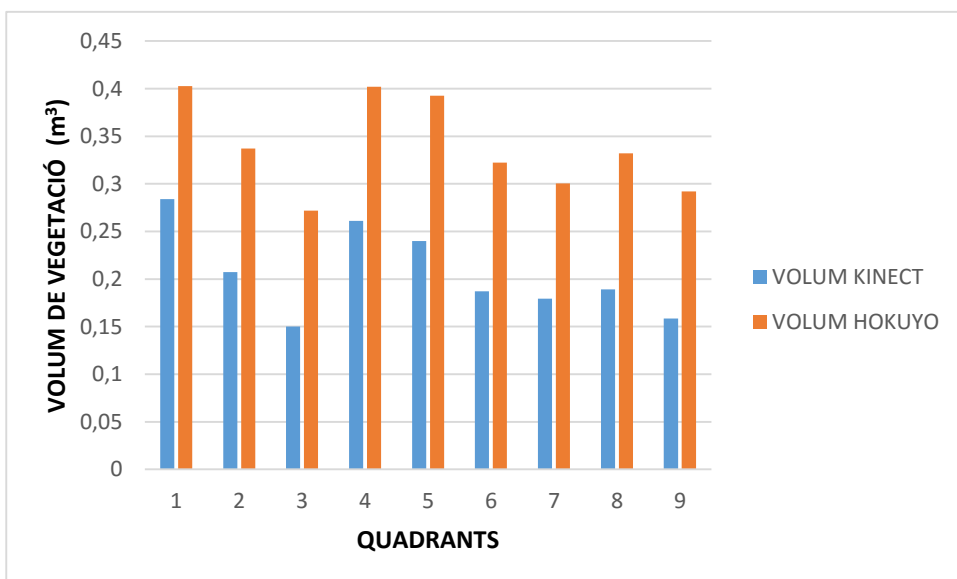
**Fig. 29** Diagrames de caixa (box plot), mitjanes (línies verdes), desviació estàndard (línies blaves) i histogrames on es representa el volum per cel·la de les façanes mesurat pels dos sensors.



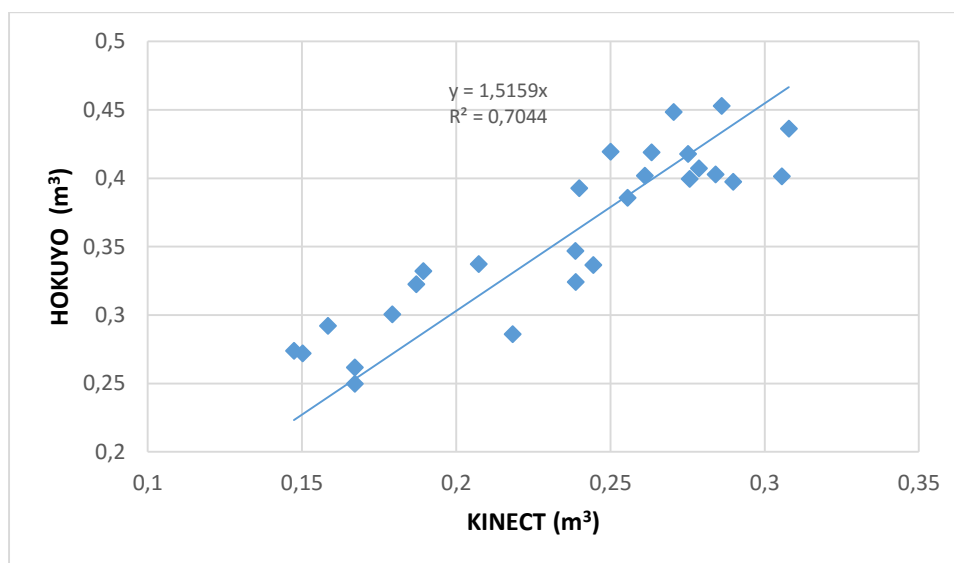
**Fig. 30** Comparativa dels volums calculats pels dos sensors, en aquest cas de la cara Est.



**Fig. 31** Comparativa dels volums calculats pels dos sensors, en aquest cas de la cara Oest.



**Fig. 32** Comparativa dels volums calculats pels dos sensors, en aquest cas de la cara Sud.



**Fig. 33** Regressió lineal on es relacionen els volums dels diferents quadrants mesurats pels dos sensors.

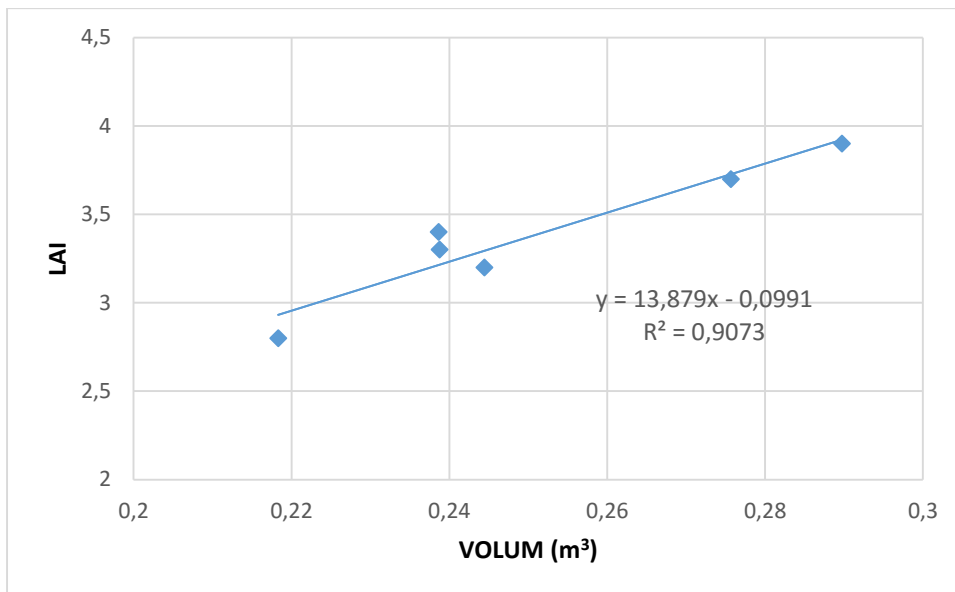
En les Fig. 30, Fig. 31 i Fig. 32, s'aporta el volum calculat per quadrants de cada perifèric. En aquestes es denota un fet rellevant i que es repeteix en les tres cares, essent els valors de la Hokuyo superiors als de la Kinect.

En la Fig. 33 s'engloben totes aquestes dades en una única gràfica per tal d'obtenir quina és la diferència en la captació de dades que s'experimenta entre els dos sensors. D'acord amb la gràfica, **el sistema Lidar majora el volum de vegetació en aproximadament un 52% respecte al sensor Kinect.**

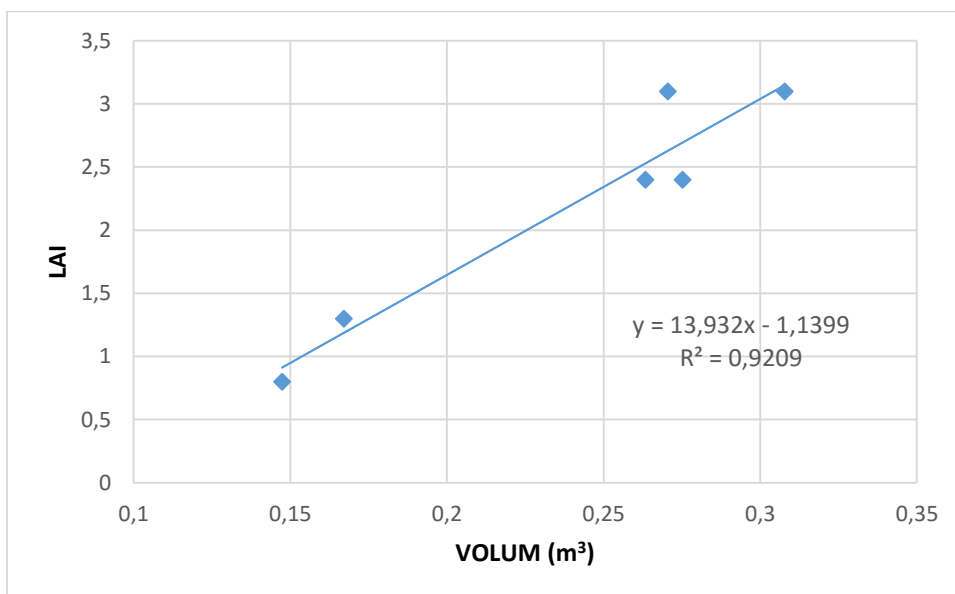


### 3.4 Relació dels volums calculats amb LAI mesurat

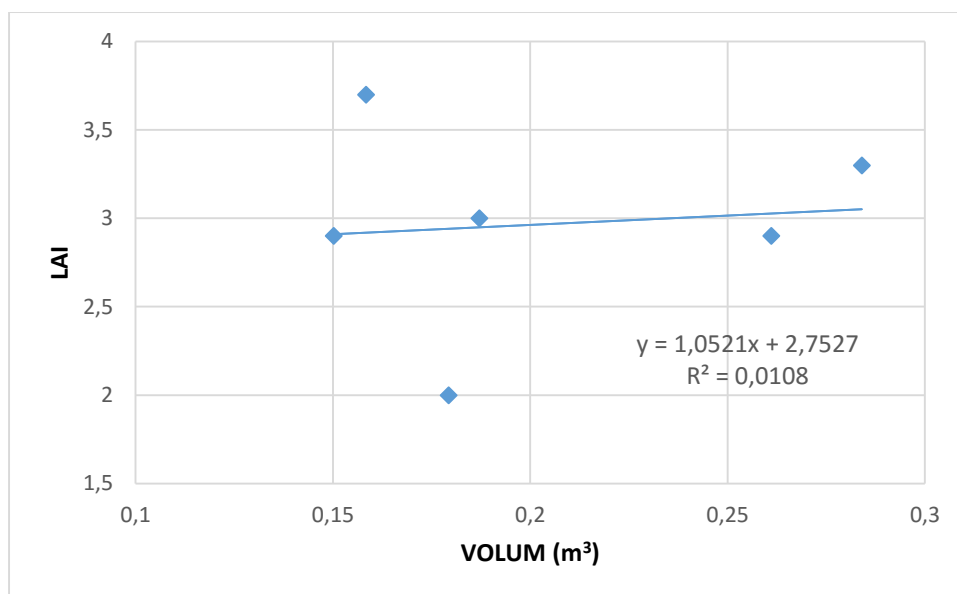
A continuació, s'exposaran una sèrie de gràfiques que tenen per objectiu relacionar els volums de vegetació pels diferents quadrants, calculats a partir de la metodologia explicada en aquest treball, amb els valors LAI recollits en l'article (12). Cal remarcar que no es van realitzar mesures del LAI pels quadrants de la columna central, motiu pel qual únicament s'han considerat 6 punts de mesura per cada cara. L'objectiu és determinar si resulta possible estimar el valor LAI a partir de les mesures del sensor Kinect.



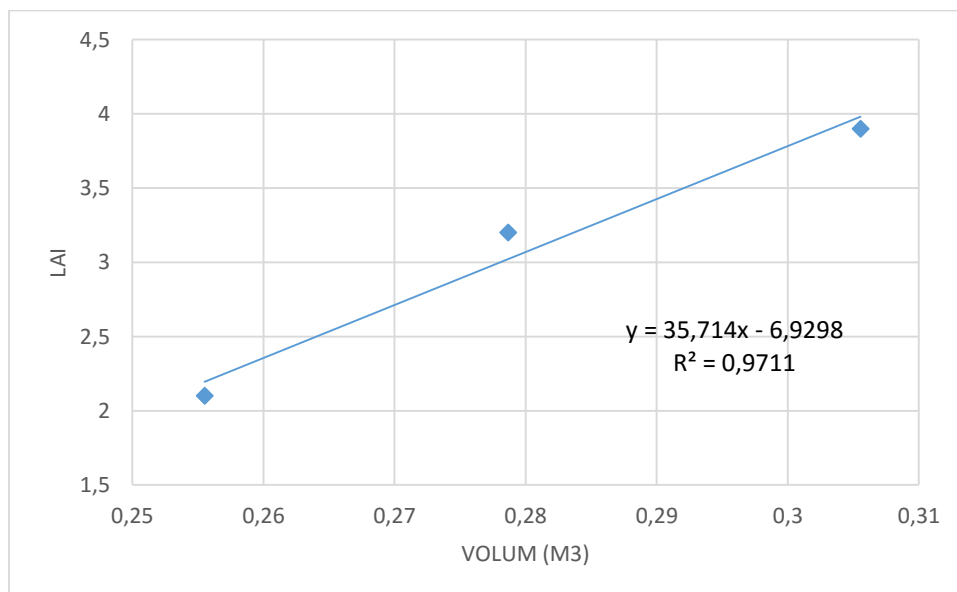
**Fig. 34** Ajust del model lineal de la cara est entre volum i LAI de les columnes 1 i 3.



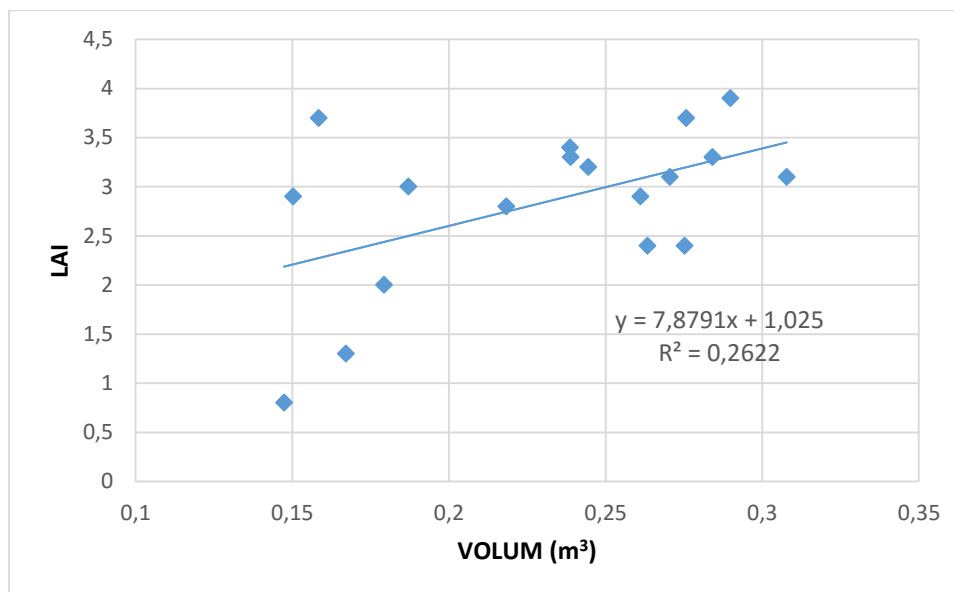
**Fig. 35** Ajust del model lineal de la cara oest entre volum i LAI de les columnes 1 i 3.



**Fig. 36** Ajust del model lineal de la cara sud entre el volum i LAI de les columnes 1 i 3.



**Fig. 37** Ajust del model lineal entre volum i LAI de la columna central de la cara est obtinguda per mitja d'un mètode destructiu.



**Fig. 38** Ajust del model lineal de les cares entre volum i LAI per quadrants de les columnes 1 i 3.

Els resultats de les figures Fig. 34, Fig. 35, Fig. 36, Fig. 37 i Fig. 38 suggereixen que existeix una correlació entre el volum de vegetació mesurat pel sensor Kinect i els valors de LAI obtinguts amb el ceptòmetre, tot i les limitacions que suposa la presa de valors puntuals de LAI. Les Fig. 34 i Fig. 35 presenten un coeficient de determinació que supera el 90% en els dos casos. En canvi, Fig. 36 presenta un coeficient molt baix, de l'ordre de l'1% fet que indica un possible error o problema en l'anàlisi d'aquesta cara. Pel que fa als valors de LAI, obtinguts per mitjà d'una mesura destructiva s'obté un coeficient de determinació de 0.9711 valor que ajuda a confirmar la hipòtesi anterior.

En la Fig. 38, on s'incorporen tots els valors de les diferents cares, aquest coeficient de determinació es veu reduït a un 0,2622 causat per les dades tan desfavorables que s'experimenten en la cara sud. Recalcar que les mesures Kinect es van realitzar un any després que les de LAI, en el 2015 les mesures indirectes (Fig. 34, Fig. 35 i Fig. 36) i en el 2013 les mesures directes (Fig. 37), i per tant, al ser un cos viu, els volums existents llavors podrien distar dels calculats avui en dia. Aquesta discrepància de valors en la cara sud pot estar determinada per aquesta diferència temporal de presa de dades. Aquests resultats responen a una estimació que en cap moment es pot prendre com a referència. Per tal d'afirmar una correlació real s'hauria d'observar la tendència seguida per aquests punts al llarg d'un any amb una presa de dades LAI també constant.

### 3.5 Relació entre els volums calculats i les temperatures superficials

En aquest apartat es realitza una comparació entre el volum de vegetació calculat a partir de les mesures Kinect i les temperatures puntuals de temperatura superficial. Destacar que les mesures de temperatura es van obtenir per mitjà d'un sensor instal·lat en el quadrant 5 (central) de cadascuna de les cares de l'edifici vegetat i de l'edifici referència, exceptuant la cara nord. Els valors de temperatura (Taula 12) s'han adquirit de l'article (12), concretament de la Fig. 4 del treball aquí present.

**Taula 12** Volum de vegetació del quadrant 5 i temperatura als edificis de referència, l'edifici estudiat i diferència de temperatura assolida.

CARA	VOLUM TOTAL (m <sup>3</sup> )	T. Edifici referència (°C)	T. Edifici vegetat (°C)	$\Delta t$
EST	0.278	45	33	12
OEST	0.249	53	36	17
SUD	0.239	55	39	16

No es pot establir una relació directa entre les temperatures superficials i el volum de vegetació, ja que la temperatura de cada cara ve afectada tant per la radiació solar incident en la mateixa com per l'efecte convectiu de l'aire. Si que resulta de major interès estudiar el salt tèrmic de cada paret (diferència de temperatures entre edifici de referència i edifici vegetat).

Per tal d'entendre les causes d'una diferència de temperatures menors en aquells quadrants amb major volum de vegetació és important comprendre la dinàmica a la que estan subjectes les diferents façanes. La incidència del Sol en la cara est s'inicia en l'horitzontal i finalitza en la vertical a mesura que passen les hores, en una zona horària on la temperatura normalment sol ser inferior. En la cara sud, la incidència es presenta totalment vertical i en el cas de la cara oest hi ha una incidència que va de la vertical a l'horitzontal. Degut a aquest fet, cal conèixer la vegetació existent tant en el quadrant 5 com en el 8, on l'últim d'aquests jugarà un paper important en aquelles hores on el Sol es posicioni en posició vertical o propera a aquesta. La presència de vegetació en el quadrant superior afectarà en major mesura a la cara sud que al restant de cares.

Amb els volums dels quadrants calculats prèviament, s'ha volgut aportar una nova dada la qual representa la distància mitjana dels quadrants respecte a la paret de l'edifici. Per aquest últim punt, s'ha estudiat a partir de les dades d'Excel de cada cara fent un filtratge de les cel·les corresponents a cada quadrant i una mitjana.

**Taula 13** Distància mitja de la vegetació respecte la paret dels quadrants 5 i 8 de cada cara.

<b>Quadrant</b>	<b>Mitjana de la distància respecte la paret (m)</b>	<b>Volum (m<sup>3</sup>)</b>
<b>5 est</b>	0.416	0.279
<b>8 est</b>	0.407	0.256
<b>5 oest</b>	0.394	0.250
<b>8 oest</b>	0.337	0.167
<b>5 sud</b>	0.386	0.240
<b>8 sud</b>	0.353	0.189

En la [Taula 13](#) s'aprecia que la cara est presenta una vegetació en el quadrant 8 a un nivell similar en relació al quadrant 5, tot i que amb un volum menor. En la cara oest hi ha una diferència dràstica de 5.7 cm entre quadrants, així com un volum bastant inferior en la part superior de la façana. La cara sud registra un volum del quadrant 8 bastant baix unit amb una dispersió d'aquest més elevat que en la cara oest. Relacionant amb la [Taula 12](#) aquestes observacions, sembla un contrasentit el fet que la diferència de temperatures més reduïda es presenti en la cara est, essent aquesta la que té un major volum de vegetació. Cal tenir en compte però que la cara est és la que rep un menor nivell de radiació solar i tal com s'observa, la seva temperatura és significativament inferior a les façanes oest i sud. Això significa que el marge de millora que pot suposar la implantació de façana vegetal en la cara est és menor que en les dues altres cares i per tant, explica el fet de tenir un menor salt tèrmic tot i el seu major volum vegetatiu. Pel que fa a les cares oest i sud, les dues presenten volums de vegetació semblants i tant les seves temperatures com salts tèrmics són similars.

De totes maneres, cal subratllar que per tal d'obtenir conclusions més fermes caldria monitoritzar les temperatures durant un llarg període de temps i realitzant l'anàlisi a partir de valors distribuïts en tot el rang de les façanes. En aquest sentit, es presenta a continuació una segona comparativa ([Taula 14](#)) en la qual s'han extret les temperatures durant 13 dies (2). En aquest cas, els resultats són més propers al que un podria esperar, donat que la cara amb menor volum de vegetació (sud) és la que presenta un salt tèrmic menor.

Per últim comentar que resulta difícil establir relacions clares entre volum de vegetació i temperatura donat que intervenen altres factors com ara els mecanismes de radiació i de convecció imperants en cada moment. Així per exemple, en dies ennuvolats, la convecció predomina sobre la radiació i el comportament de la façana vegetal canviarà substancialment.

**Taula 14** Mitja de diferències de temperatures entre l'edifici vegetat i l'edifici de referència en un període de 13 dies.

<b>CARA</b>	<b>VOLUM TOTAL (m3)</b>	<b><math>\Delta t</math></b>
<b>EST</b>	0.27865514	13.8
<b>OEST</b>	0.249970688	13.9
<b>SUD</b>	0.239848278	10.7

## 4 CONCLUSIONS

L'objectiu del treball era desenvolupar una metodologia amb la qual es pogués calcular el volum d'un model tridimensional de vegetació vertical obtingut per un sensor Kinect. D'altra banda, també es pretenia avaluar la precisió d'aquest envers un sistema Lidar i així posteriorment poder valorar dos punts:

- Si el mètode proposat era vàlid per a l'estudi d'aquests tipus de sistemes.
- Si el perifèric podia arribar a substituir a un sistema més consolidat en aquests tipus d'estudis com és el Lidar.

Recalcar les possibilitats que en el cas que ens ateny ofereix el sensor Kinect v2, com una captació i representació fidel d'un objecte de difícil estudi amb grans diferenciacions respecte al sistema Lidar. Entre aquestes diferències cal remarcar que la Kinect proporciona una característica important com el color, la capacitat de generar models tridimensionals en un espai de temps curt i per últim, però no menys important, té un preu de compra significativament més baix que el sistema Lidar, Hokuyo.

Per contra, el fet que s'hagin realitzat pocs estudis previs en línies similars ha comportat una dificultat extra pel que fa al procés d'orientació, recreació i estudi de l'objecte 3D aportat en arxius independents. Altrament, la poca varietat d'estudis previs en aquest àmbit, ha esdevingut una dificultat a l'hora d'extreure tot el potencial que de segur es podria haver aportat si la difusió i informació hagués estat major.

En relació als perifèrics concloure, tot i els aspectes negatius esmentats, que el sistema de Microsoft Kinect v2 (o sistemes semblants) pot i creiem que així ho farà, substituir altres sistemes com el Lidar en estudis d'índole similar. Aquesta afirmació ve suportada pel fet que el sistema estudiat aquí ha resolt la caracterització tridimensional de millor manera que el sistema Lidar, on recordem que la limitació en la rasterització de les façanes per tal d'ajustar més les dimensions de les cel·les i per tant dels volums, la va aportar aquest últim. Afegir que amb un pressupost molt baix s'aconsegueix una gran aportació de dades que en confluència amb softwares específics com el que aquí s'estudia, fan en la meua opinió, aquests tipus de projectes viables en la seva totalitat.

Tot i exposar-se prèviament en el treball, remarcar que el sistema Lidar envers la Kinect v2 majora aproximadament en un 52% els valors adquirits. Aquesta és una aportació original d'aquest treball i resta pendent en futurs treballs la realització de nous assajos intercomparatius, utilitzant blancs geomètricament coneguts, per tal de determinar l'origen d'aquesta diferència.

En referència als objectius secundaris, remarcar que les correlacions que s'han volgut dur a terme han originat resultats dispars. Recalcar que les dades captades, en els diferents edificis d'estudi, tant en el cas del LAI com de temperatures eren de caràcter puntual i per tant insuficients en nombre fet que comporta que totes les conclusions són estimacions fetes a partir única i exclusivament d'aquestes dades. Per tant, aquests punts del treball no poden establir una pauta plausible per a posteriors estudis.



En els resultats mostrats en el cas del LAI s'entreveu un camí positiu per a la correlació amb el sensor. Pel que fa a l'apartat de temperatures es requereix un major treball de recerca. La solució a aquests punts, roman en desenvolupar un sistema, existent ja en el cas del LAI però no en temperatures, de captació de dades contínues.

En conclusió, en aquest treball s'ha desenvolupat i demostrat experimentalment una nova metodologia per caracteritzar sistemes verticals de vegetació basada en el sensor Kinect. La metodologia presentada resta oberta per al desenvolupament i millora per part d'investigadors que ho creguin adient.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

1. *Façanes vegetades: Estudi del seu potencial com a sistema passiu d'estalvi d'energia, en clima mediterrani continental.* **G, Pérez.** s.l. : Àmbits de recerca en l'energia i el medi ambient a l'arquitectura, 2010. 13-50.
2. *Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades.* **Julià Coma, Gabriel Pérez, Alvaro de Garcia, Silvia Burés, Miguel Urrestarazu, Luisa F.Cabeza.** Lleida : Elsevier, 2017, Building and environment, pág. 10.
3. *Logros y expectativas de la agricultura de precisión.* **Gregorio E, Escolà A, Planas de Martí S, Rosell J.R, Solanelles F, Martínez J.A.** s.l. : Agricultura , 2014. 1-6.
4. *Crop structure and the penetration of direct sunlight.* **Lang ARG, Yuegin X, Norman JM.** 35, s.l. : agric for meteorol, 1985. 83-101.
5. *Development of hydroponic systems for urban facade greenery. In: Proceedings of international symposium on soilless culture and hydroponics.* **Wolter S, Debil J, Schroeder FG.** p.843, s.l. : Acta horticulturae.
6. *Energy simulation of greenery systems.* **Wong NH, Tan AYK, Wong NC.** 41, s.l. : Energy Build, 2009. 1401-8.
7. *Shading performance of vertical deciduous climbing plant canopy.* **Ip K, Lam M, Miller A.** 67, s.l. : Build Environ, 2010. 1-13.
8. *A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance.* **Susorova I, Angulo M, Bahrami P, Stephens B.** 67, s.l. : Buil Environ, 2013. 1-13.
9. *Modelling the energy performance of living walls: validation against field measurements in temperate climate.* **Scarpa M, Mazzali U, Peron F.** 79, s.l. : Energy Build, 2014. 155-63.
10. *Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings.* **Pérez G, Rincón L, Vila A, Gonzalez JM, Cabeza LF.** 88, s.l. : Appl Energy, 2011. 4854-9.
11. *New green facades as passive systems for energy savings on buildings .* **Coma J, Pérez G, Solé C, Castell A, Cabeza LF.** 57, s.l. : Energy Proc, 2014. 1851-9.
12. *Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect.* **Pérez G, Coma J, Sol S, Cabeza L.** s.l. : Applied Energy, 2017. 424-437.
13. *A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops.* **Rosell J.R, Sanz R.** s.l. : Comp an Electronics in agriculture, 2012. 124-141.